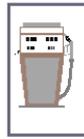


# Chapitre 4 Bilan Energétique



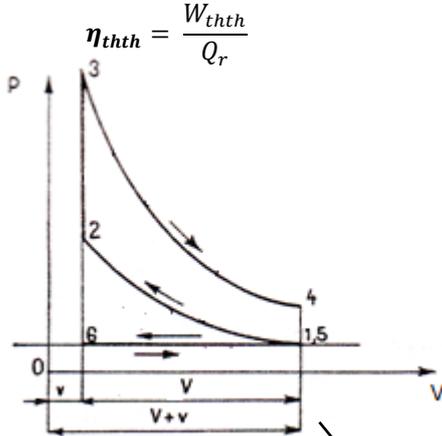
Energie chimique :  $m_c \times PCI$   
 Puissance chimique :  $qm_c \times PCI$

$$\eta_c = \frac{Q_r}{m_c \times PCI}$$

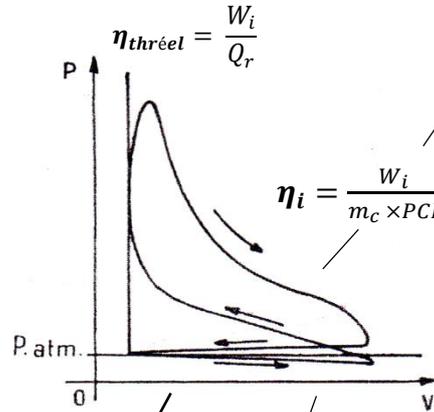


Energie calorifique :  $Q_r$   
 Puissance chimique :  $Q_r/t$

Travail thermodynamique théorique :  $W_{thth}$



Travail thermodynamique réel :  $W_{thréel}$



$$\eta_i = \frac{W_i}{m_c \times PCI} = \frac{P_i}{qm_c \times PCI}$$

$$\eta_{forme} = \frac{\eta_{thréel}}{\eta_{thth}} = \frac{W_i}{W_{thth}} = \eta_{cycle}$$

$$\eta_{forme} = \frac{\eta_{thréel}}{\eta_{thth}} = \frac{W_i}{W_{thth}} = \eta_{cycle}$$

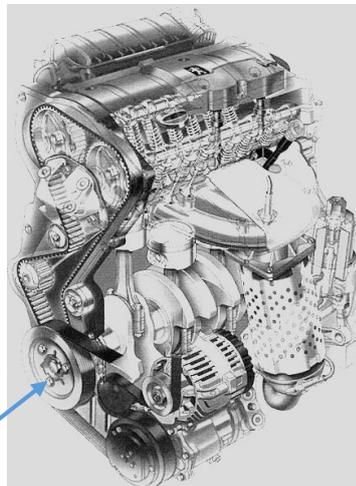
$$\eta_{eff} = \frac{W_e}{m_c \times PCI} = \frac{P_e}{qm_c \times PCI} = \eta_e = \eta_g$$

$$\eta_{eff} = \eta_i \times \eta_{méca}$$

$$\eta_{eff} = \eta_c \times \eta_{thth} \times \eta_{cycle} = \eta_c \times \eta_{thréel}$$

$$\eta_{méca} = \eta_{méca} = \frac{W_e}{W_i} = \frac{P_e}{P_i}$$

Travail effectif :  $W_e$   
 Puissance effective :  $P_e$



## 1- Les rendements

### 1.1- Rendement effectif : « $\eta_{eff}$ »

Le rendement effectif ou global d'un moteur représente le rapport de l'énergie effective recueillie sur l'arbre moteur sur l'énergie chimique produite par le combustible.

$$\eta_{eff} = \frac{\text{Energie effective reçue sur l'arbre}}{\text{energie chimique}} = \frac{W_e}{m_c \times P_{ci}}$$

### 1.2 Energie chimique introduite par le combustible

Chaque kilogramme de carburant contient une quantité d'énergie chimique potentielle qui peut être transformée en chaleur par le processus de la combustion. La quantité d'énergie dépend du pouvoir calorifique, qui exprime l'énergie libérée par la combustion complète d'une mole (KJ/mole) ou d'un kilogramme (KJ/Kg), de carburant.

La combustion n'est effective que si chaque constituant du carburant a réussi à se combiner avec l'oxygène.

L'énergie libérée par la combustion d'une masse "m" de carburant de pouvoir calorifique donné est exprimée par :

$$Q = m_c \times P_{ci}$$

Où :  $m_c$ - masse du combustible

$P_{ci}$ - pouvoir calorifique

### 1.3 Rendement du combustible « $\eta_c$ »

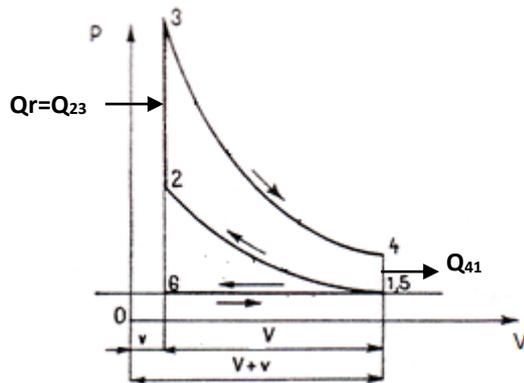
La combustion réelle dans le moteur ne libère pas toute l'énergie du combustible, en effet une partie des réactions physico-chimiques ne peut s'effectuer par manque de temps ou par insuffisance locale d'oxygène, ce qui reflète le rendement de la combustion.

Le rendement de combustion représente l'énergie réellement libérée par la combustion "Qr" dans le cylindre et l'énergie théoriquement contenue dans le carburant, il est exprimé par :

$$\eta_{comb} = \frac{Q_r}{m_c \times P_{ci}}$$

### 1.4- Rendement thermodynamique théorique « $\eta_{thth}$ »

Lors de la combustion, le carburant libère une quantité de chaleur "Qr" durant la transformation isochore (exemple : cycle Beau de Rochas) présenté dans la figure ci-dessous. Ce qui engendre une élévation de la pression qui provoque une détente adiabatique (3-4) permettant de produire le travail mécanique correspondant à l'aire (1,2,3,4).



- $W_{12} + W_{34} = \text{travail thermodynamique théorique du cycle (aire 1,2,3,4)}$
- $W_{23} = W_{41} = 0$   
( $W = \int P dv = 0$ , pas de variation de volume)
- $Q_r > W_{\text{cycle}}$

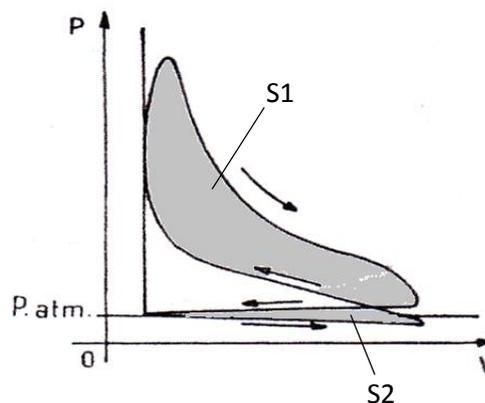
Le rendement thermodynamique théorique représente le rapport entre le travail thermodynamique du cycle théorique  $W_{thth}$  et l'énergie dégagée par la combustion " $Q_r$ ".

$$\eta_{thth} = \frac{W_{thth}}{Q_r} = \frac{Q_{23} + Q_{41}}{Q_{23}}$$

Remarque :  $Q_{41} < 0$  (perte)

### 1.5- Rendement thermodynamique réel « $\eta_{thréel}$ ou $\eta_{thermique}$ »

Le cycle réel ou cycle indiqué est différent du cycle théorique pour plusieurs raisons. L'aire ( $S1-S2$ ) du cycle réel représente le travail indiqué ( $W_i = S1 - S2$ ) est nettement inférieure à celle mesurée sur le cycle théorique (aire 1,2,3,4).



Le rendement thermodynamique réel est défini par l'expression :

$$\eta_{thréel} = \frac{W_i}{Q_r}$$

### 1.6- Rendement de forme « $\eta_{forme}$ »

Le rendement de forme permet d'estimer l'importance du rendement réel du cycle par rapport au rendement théorique, il est estimé par le rapport :

$$\eta_{forme} = \frac{\eta_{thr\acute{e}el}}{\eta_{thth}}$$

Ce qui permet de comparer le travail réellement produit par le cycle par rapport au travail du cycle théorique, alors :

$$\eta_{forme} = \frac{W_i/Q_r}{W_{thth}/Q_r} = \frac{W_i}{W_{th}}$$

### 1.7- Rendement mécanique « $\eta_i$ »

Le rendement indiqué est défini par l'expression :

$$\eta_i = \frac{W_i}{m_c \times P_{ci}}$$

### 1.8- Rendement mécanique « $\eta_{méc}$ »

Le rendement mécanique constitue le rapport entre le travail effectif et le travail indiqué réellement fourni par le cycle, il est exprimé par :

$$\eta_{fméc} = \frac{W_{eff}}{W_i}$$

Le rendement mécanique est conditionné par un certain nombre de pertes, il permet d'estimer le travail réellement utilisable sur l'arbre moteur. Ces pertes ont pour origines, les frottements internes des pièces mobiles (pistons/cylindre, attelage mobile) et d'autre part, l'énergie d'entraînement des organes auxiliaires (organes de distribution, de refroidissement, de lubrification,....).

### 1.9- Exemples

#### a) Cas d'un moteur à explosion (AC)

Sur 100 Kcal fournies par le combustible :

- 28 environ sont transformées en travail effectif
- 40 environ sont évacuées avec les gaz brûlés
- 20 environ sont emportées par l'eau de refroidissement
- 8 sont perdues par combustion incomplète
- 4 sont prises par l'entraînement des organes auxiliaires, par l'échauffement de l'huile, par le rayonnement du moteur

Le rendement global pour ce cas est de 0.28.

## b) Cas d'un moteur Diesel

Pour un moteur lent, de moyenne ou forte puissance, sur 100 Kcal produites par la combustion :

- 38 environ sont transformée en travail effectif
- 32 environ sont évacuées à l'échappement
- 24 sont emportées par l'eau de refroidissement
- 6 sont utilisées à l'entraînement des organes auxiliaires : pompes d'huile de graissage, pompe à combustible, rayonnement...

Le rendement global est de 0.38 ; il peut atteindre 0.42 pour certains gros moteurs lents

## 2- Causes des pertes dans un moteur

Les pertes d'énergie dans un moteur à combustion interne sont dues :

- Aux pertes liées au cycle thermodynamique pour la plus grande part : toute la chaleur fournie ne peut pas être récupérée mécaniquement, la part restante se perdant dans les gaz d'échappement (voir cycle de Carnot) ;
- aux pertes liées au refroidissement du moteur, nécessaire pour le maintenir à une température que peuvent supporter ses éléments ;
- aux pertes par frottement :
  - dans la transmission (quel que soit son type) ;
  - des pistons dans les cylindres ;
  - dans l'embiellage et sur l'axe du vilebrequin ;
  - au niveau de la distribution (arbre à cames notamment) ;
  - des gaz à l'admission et à l'échappement ;
- aux besoins des accessoires nécessaires au fonctionnement du moteur (pompes d'injection, pompe à eau, ventilateur, alternateur...)

À l'exception de l'énergie consommée par les accessoires, toutes ces pertes se transforment en chaleur.

## 3- Lutte contre les pertes

### 3.1- Du cycle thermodynamique

La lutte contre les pertes dues au cycle thermodynamique peut être réalisée :

- En augmentant le taux de compression, les limites étant l'auto-allumage pour les moteurs à essence. La température de fonctionnement augmente avec le taux de compression. Une suralimentation avec un compresseur mécanique ou un turbocompresseur permet d'améliorer le rendement notamment du fait qu'on peut refroidir les gaz admis en cours de compression, ce qui réduit la consommation d'énergie

mécanique inhérente au cycle thermodynamique (pour les moteurs à explosion, l'auto-allumage limite toujours la pression maximale admissible).

- En augmentant la course de détente, de façon à récupérer un maximum de puissance mécanique.

### **3.2- Du refroidissement du moteur**

- En isolant thermiquement certaines pièces, par exemple avec de la céramique (tête de piston, culasse et même le cylindre). Cette solution pose des problèmes de prix, de fissuration et d'usure, elle est utilisée principalement en compétition (où le coût et la maintenabilité ne sont pas des critères prépondérants).
- En utilisant des moteurs à pistons opposés, supprimant totalement les pertes thermiques des culasses.

### **3.3- De l'ensemble des frottements**

- Avec un cycle à deux temps car il y a moins de tours par cycle moteur, ce qui pose des problèmes de pollution à cause de la combustion de l'huile de lubrification et pour lequel, sans injection directe, une partie du carburant part dans l'échappement.
- En diminuant les efforts de frottement, soit en diminuant les efforts entre les pièces par une plus grande précision dimensionnelle (pièces mieux appariées avec des jeux mieux maîtrisés), soit en diminuant les coefficients de frottements :
  - Par amélioration des surfaces des pièces : meilleurs états de surface (pièces plus lisses), traitement de surface (thermique ou chimique, exemple : nitruration)
  - Par modification du design des pièces afin de limiter les surfaces de contact.
  - Par une meilleure lubrification, en modifiant le fluide lubrifiant : emploi des huiles possédant de meilleures propriétés ou en modifiant le circuit de lubrification.

#### **3.3.1- Des frottements piston/cylindre**

En prévoyant des systèmes de coulisseaux (moteurs industriels fixes) ou des transformations de mouvement à came annulant les efforts latéraux.

#### **3.3.2- Des frottements bielles et vilebrequin**

En modifiant la technologie des paliers par exemple en remplaçant les paliers lisses par des roulements à billes (moteurs de motos et sur quelques bi-cylindres automobile), mais ce qui amène à des durées de vie limitées et des problèmes de maintenabilité.

#### **3.3.3- Des frottements de distribution**

En utilisant des commandes de soupape électriques, pneumatiques ou hydrauliques, au contrôle délicat.

## 4- Amélioration du rendement des moteurs

### 4.1- Les embiellages à roulements à aiguille

Les paliers à aiguille ont moins de frottement que les paliers lisses, mais les bielles ne sont pas démontables et il faut assembler le vilebrequin et les bielles ensemble. Les bielles étant plus légères, ceci facilite aussi les régimes rapides. C'est une technologie courante en moteur moto, l'une des rares applications en automobile a été le moteur des Panhard des années 1950 et 1960, qui comportaient deux cylindres à plat. Cette solution n'est pas adaptée pour des manetons de gros diamètre.

### 4.2- Les moteurs à désactivation d'une partie des cylindres

On cesse de faire fonctionner les soupapes sur certains cylindres quand la demande est faible. De ce fait, les cylindres restants fonctionnent à plus forte charge donc à meilleur rendement. Malheureusement il reste toujours les pertes par frottement sur les cylindres désactivés, on ne supprime que les pertes de pompage. La gestion de l'équilibre thermique du moteur est délicate. Cette solution s'utilise sur des moteurs de haut de gamme de forte cylindrée, généralement à plusieurs rangées de cylindres.

### 4.3- Les soupapes à levée variable

La **distribution variable** est une technologie moderne, elle permet de faire varier plusieurs paramètres dans un moteur à combustion interne : le calage (abrégée aussi VVT pour *variable valve timing*), la durée d'ouverture et/ou la levée (*variable valve lift*) des soupapes d'admission et d'échappement. Ces paramètres varient essentiellement en fonction du régime, de la charge et de la demande d'accélération. Les avantages de la distribution variable sont un couple important à bas régime, une forte puissance à haut régime, un meilleur rendement et une pollution affaiblie.

Il existe des systèmes de levée variables mécaniques ou d'autres sans arbres à cames à commande pneumatique, hydraulique ou électrique dit camless. On peut faire varier le remplissage du cylindre en améliorant le rendement à charge partielle. On modifie aussi les avances et retard d'ouverture en temps réel en fonction des paramètres instantanés du moteur. L'un des objectifs est notamment de ne plus avoir de papillon d'admission, limitant ainsi les pertes d'écoulement.

L'emploi des soupapes électriques, en plus de la levée variable, permet de diminuer les pertes de la distribution car la consommation électrique pour la levée des soupapes demande moins de puissance qu'un arbre à cames traditionnel. Les soupapes à levée pneumatique sont utilisées sur certains moteurs de camions.

#### **4.4- Les pistons sans efforts latéraux**

Le moteur Revetec propose un système remplaçant le système bielle/vilebrequin par une double came annulant totalement les efforts latéraux. Les pistons étant entraînés par des roulements roulant sur la came, il y a aussi un gain sur la transformation du mouvement linéaire en mouvement rotatif (pas de paliers lisses). Le rendement maximum peut atteindre 38 % pour un moteur à allumage dont la distribution et les culasses sont relativement primitives.

#### **4.5- La récupération de l'énergie d'échappement avec une turbine**

Emploi des turbocompresseurs, qui utilisent l'énergie de l'échappement pour comprimer les gaz d'admission.

Il est aussi possible de coupler la turbine à l'arbre de transmission de façon à récupérer une partie de la puissance (moteurs turbo-compound (en)). Cette solution a été développée sur des moteurs d'avions à la fin des années 1940 et est utilisée actuellement sur des moteurs de camion Detroit Diesel (en) et Scania.

#### **4.6- La récupération de l'énergie de refroidissement**

Le moteur récupère la chaleur de refroidissement et d'échappement par injection directe d'air dans le cylindre lors de l'échappement (moteur Velozeta). Il présente l'avantage additionnel de diminuer la pollution du fait d'un meilleur balayage du cylindre.

Le moteur thermique à récupération d'énergie : C'est le principe d'un moteur thermique couplé au principe d'un moteur à air chaud de type Ericsson, la liaison entre les deux systèmes est réalisée par un piston multifonctions. Il est espéré un rendement global de 65 %.

### **5- Le rendement maximal**

Les meilleurs rendements de moteurs à explosion sont obtenus sur des moteurs industriels Diesel brûlant du fioul lourd destinés aux bateaux ou aux centrales électriques. Leur rendement dépasse légèrement 50 %. Ces moteurs de grande puissance (7 500 à 90 000 kW) sont des moteurs deux temps à longue course (plus de deux fois le diamètre du piston), équipés de turbocompresseurs délivrant des pressions de suralimentation de plusieurs bars.

Leurs bielles n'actionnent pas directement les pistons mais des coulisseaux, de ce fait les pistons ne reçoivent aucune poussée latérale et s'usent très peu. Ces moteurs sont très hauts, leur durée de vie dépasse les 50 ans. Ces moteurs tournent très lentement, Pour un moteur de 90 000 kilowatts, la vitesse de rotation est de 65 à 100 tr/min et permet l'entraînement direct d'une hélice sans réducteur. La hauteur dépasse 17 mètres (six étages), la masse est de plus de 2 000 tonnes et le diamètre des cylindres est d'environ 1 mètre.

Ces moteurs ont souvent des lumières d'admission et une soupape d'échappement. Afin d'atteindre de tels rendements, une partie de l'énergie des gaz d'échappement est récupérée via des turbo-alternateurs et peut être restituée à la ligne d'arbre grâce à des machines synchrones.