

Principe d'un moteur essence

Le principe des moteurs a déjà été analysé en détail en cours, en TD, en DM et en fiche complémentaire (rendement). Cet exercice résume le fonctionnement d'un moteur à essence

Exercice 1 : Moteur automobile (essence)

Les moteurs sont classés en deux catégories suivant la technique d'inflammation du mélange air carburant : les moteurs à allumage commandé (moteurs à essence) et les moteurs à allumage par compression (auto-inflammation du mélange, moteurs Diesel). Ce sont tous deux des moteurs à combustion interne car la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur. Dans le cas des moteurs à allumage commandé, un mélange convenable air essence obtenu à l'aide d'un carburateur est admis dans la chambre de combustion du cylindre. L'allumage y est provoqué par une étincelle éclatant entre les deux électrodes d'une bougie.

Le moteur comporte en général plusieurs cylindres. Dans chaque cylindre, le piston entraîné par le vilebrequin permet de recevoir le travail mécanique des forces pressantes lors de la dilatation des gaz chauds produits par la combustion de l'essence. Il coulisse entre le point mort haut (PMH) où le volume $V_{\min}$ de la chambre de combustion est minimal et le point mort bas (PMB) où le volume $V_{\max}$ de la chambre de combustion est maximal. Le volume ainsi balayé est appelé la cylindrée, il est noté $C_V = V_{\max} - V_{\min} = 2000 \text{ cm}^3 = 2\text{L}$. Le mélange détonant air essence est introduit dans le cylindre par l'intermédiaire d'une valve : la soupape d'admission. Les gaz de combustion sont évacués par une autre valve : la soupape d'échappement. L'ouverture et la fermeture des valves sont commandées par l'arbre à cames et les culbuteurs.

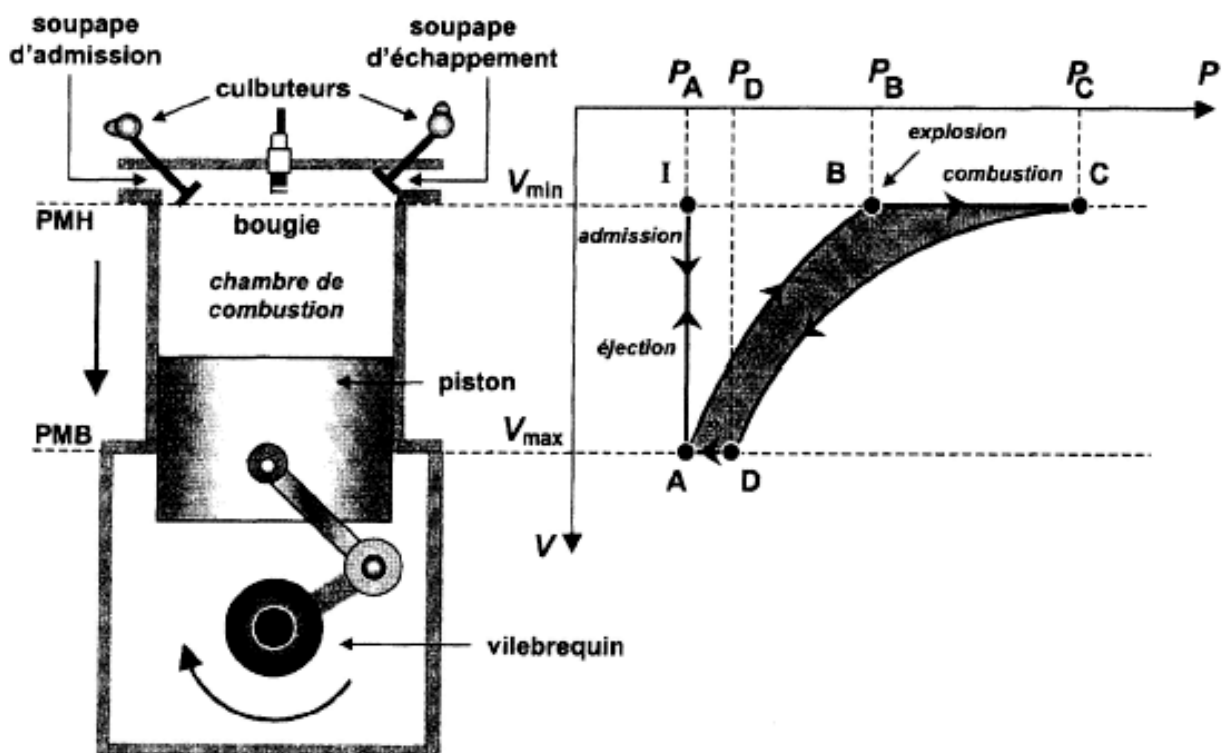
Le fonctionnement du moteur est cyclique. Il se décompose en 4 temps successifs décrit comme suit :

- 1^{er} temps : l'admission. La soupape d'admission s'ouvre ; le piston descend et aspire le mélange gazeux air essence venant du carburateur.
- 2^{ème} temps : la compression. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées ; le piston, en remontant, comprime le mélange.
- 3^{ème} temps : la combustion et la détente. Les soupapes sont encore fermées : une étincelle jaillissant de la bougie provoque la combustion du mélange. La pression augmente brutalement, le piston est repoussé : ce temps est moteur.
- 4^{ème} temps : l'échappement. Le piston remonte, la soupape d'échappement s'ouvre. Les gaz brûlés sont éjectés.

A la fin du quatrième temps, le piston et les soupapes sont revenus dans leur position initiale.

Le fonctionnement du moteur est schématisé sur un diagramme de Watt (P,V) où P est la pression du gaz contenu dans le volume V de la chambre du cylindre. Les étapes successives du cycle sont décrites comme suit :

- I → A : admission du mélange gazeux air essence dans la chambre de combustion à la température ambiante $T_A = 300\text{K}$ et sous la pression atmosphérique $P_A = 1 \text{ bar}$;
- A → B : compression adiabatique réversible du mélange air essence (les frottements du piston sur le cylindre sont négligés) ;
- B → C : en B, l'étincelle provoque l'explosion du mélange suivie d'une compression isochore ;
- C → D : en C, fin de la combustion suivie d'une détente adiabatique réversible du gaz brûlé ;
- D → A : l'ouverture de la soupape d'échappement ramène le gaz brûlé à la pression atmosphérique ;
- A → I : la remontée du piston évacue le gaz brûlé vers l'extérieur



Le système fermé constitué du fluide gazeux décrit indéfiniment le cycle ABCDA appelé cycle Beau de Rochas (brevet d'invention déposé en 1862, première mise en application sur monocylindre en 1876 par Otto). Dans cette approche idéalisée, le mélange initial air essence et les gaz brûlés d'échappement sont assimilés à un même gaz de coefficient $\gamma = C_{pm} / C_{vm} = 1,35$ constant et le nombre n de moles de gaz admis dans le cylindre (à l'état A) est supposé inchangé par la combustion interne.

1. Etude du cycle

- 1.1. Justifier le caractère adiabatique de la compression $A \rightarrow B$, de la détente $C \rightarrow D$ et le caractère isochore de la combustion $B \rightarrow C$ et du refroidissement $D \rightarrow A$. Pourquoi ne prend-t-on pas en compte les étapes $I \rightarrow A$ et $A \rightarrow I$ au cours desquelles le système constitué par le gaz contenu dans le cylindre est un système ouvert ?
- 1.2. Exprimer le transfert thermique Q_{BC} mis en jeu dans l'étape $B \rightarrow C$, en fonction de R , n , γ , T_B et T_C . Dans quel sens le transfert thermique Q_{BC} s'effectue-t-il ?
- 1.3. Exprimer le transfert thermique Q_{DA} dans l'étape $D \rightarrow A$, en fonction de R , n , γ , T_D et T_A . Dans quel sens le transfert thermique Q_{DA} s'effectue-t-il ?
- 1.4. Exprimer le travail échangé W au cours du cycle ABCD, en fonction de Q_{BC} et Q_{DA} .

2. Rendement thermique

- 2.1. Définir puis exprimer le rendement thermique η_{th} (celui habituellement étudié) en fonction de Q_{BC} et Q_{DA} , puis en fonction de T_A , T_B , T_C et T_D .
- 2.2. Le rapport volumétrique a , encore appelé taux de compression est défini par $a = V_{max} / V_{min}$. Exprimer le rendement thermique η_{th} en fonction de γ et de a uniquement. Comment η_{th} varie-t-il en fonction de a ? Calculer sa valeur pour un rapport volumétrique $a = 9$ (cette valeur sera conservée dans la suite du problème).
- 2.3. Le rendement global η du moteur dépend du rendement thermique η_{th} mais aussi du rendement mécanique $\eta_{méca}$ caractérisant le transfert d'énergie du piston vers le vilebrequin. Le rendement mécanique n'excède pas 85% et peut descendre en dessous de 60% pour un moteur usagé. Calculer le rendement global η du moteur pour un rendement mécanique $\eta_{méca} = 75\%$ et en déduire le volume d'essence produisant effectivement du travail sur 10L d'essence consommés.

3. Influence de la combustion

La réaction qui a lieu au sein de la chambre est une réaction de combustion entre le carburant (dans le problème, l'octane C_8H_{18} , de masse volumique $\mu_{oct} = 720 \text{ kg.m}^{-3}$, sera choisi) et le comburant, l'air. Ceux-ci sont injectés dans des proportions stœchiométriques.

- 3.1. Exprimer puis calculer le nombre de moles du mélange gazeux aspiré par le cylindre au cours de la phase d'admission $I \rightarrow A$, en fonction de P_A , T_A , R et C_V .
- 3.2. Au point B du cycle, exprimer la température T_B et la pression P_B qui règnent dans la chambre de combustion au moment de l'explosion, en fonction de T_A , P_A , a et γ . Effectuer les applications numériques.

3.3. Une anomalie de combustion est l'auto-allumage qui limite l'augmentation a priori recherchée du rapport volumétrique : le mélange air essence s'enflamme spontanément dans certaines conditions de confinement avant le déclenchement de l'étincelle. Ce phénomène est reconnaissable aux cliquetis métalliques émis par le moteur. La température d'auto-allumage étant de 430°C , calculer le rapport volumétrique maximal a_{max} permettant d'éviter l'auto-allumage au cours de la phase $A \rightarrow B$. en déduire le rendement thermique maximal du moteur dans ces conditions.

3.4. Ecrire l'équation de la combustion. En déduire la masse m d'octane injectée pour la combustion, sachant que la composition de l'air (en pourcentages molaires) est 20,9% en O_2 et 79,1% en N_2 .

3.5. Expliquer pourquoi le mélange initial air essence et les gaz d'échappement peuvent être assimilés en première approximation à un même gaz parfait. Justifier qualitativement pourquoi le meilleur fonctionnement du moteur est obtenu lorsque carburant et comburant constituent un mélange stœchiométrique.

3.6. Le Pouvoir Calorifique Inférieur (noté PCI) est la quantité de chaleur libérée par kilogramme de carburant. Dans le cas de l'octane et dans ces conditions de confinement, il est de 44700 kJ.kg^{-1} . Calculer la température T_c et la pression P_c qui règnent dans la chambre en fin de combustion. Comment expliquez-vous ces valeurs anormalement élevées ?

3.7. L'automobile se déplace sur une autoroute à la vitesse constante de 110 km.h^{-1} , le vilebrequin effectuant 3500 tours par minute. En supposant que le moteur fonctionne exactement selon le cycle Beau de Rochas, un cycle correspondant à 2 tours du vilebrequin, calculer la consommation en carburant C pour 100km parcourus et la puissance P développée par le véhicule en chevaux (un cheval-vapeur est équivalent à une puissance de 736W). Commenter ce résultat.

Cycles Moteurs : Calcul de Rendement

Exercice 2 : Rendement du cycle de Stirling

→ Voir Exercice 1.1 du TD22 et Fiche Rendement des Moteurs

→ Calculer le rendement η d'un cycle de Stirling (2 isothermes / 2 isochores) effectué par un gaz parfait de coefficient caractéristique γ entre une source chaude de température T_c et une source froide de température T_f . On définit le taux de compression $\alpha = V_{max}/V_{min}$. Montrer que :

$$\eta_{Stirling} = \frac{1}{\frac{1}{(\gamma-1) \ln \alpha} + \frac{T_c}{\Delta T}}$$

Principe du moteur essence

Exercice 1 : Moteur automobile (essence)

1.1. Transfo adiabatique ? Les transferts thermiques lors de la compression et de la détente sont lents par rapport à la durée des évolutions

Transfo isochore ? La combustion et le refroidissement sont trop rapides pour que le piston ait le temps de se déplacer.

Prise en compte des étapes I→A et A→I : Non nécessaire car les travaux et chaleurs se compensent sur l'ensemble.

1.2. Etape B→C : $Q_{BC} = \Delta U = C_V (T_C - T_B) = \frac{nR}{\gamma-1} (T_C - T_B)$

On a $Q_{BC} > 0$ → Chaleur reçue par le gaz lors de combustion.

1.3. Etape D→A : $Q_{DA} = \Delta U = C_V (T_A - T_D) = \frac{nR}{\gamma-1} (T_A - T_D)$

On a $Q_{DA} < 0$ → Chaleur fournie par le gaz.

1.4. Premier principe : $W + Q_{BC} + Q_{DA} = 0 \Rightarrow W = -Q_{BC} - Q_{DA}$

2.1. Rendement $\eta_{th} = \frac{W}{Q_{BC}} = \frac{-W}{Q_{BC}} = \frac{Q_{BC} + Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{(T_A - T_D)}{(T_C - T_B)}$

2.2. On a la loi de Laplace $TV^{\gamma-1}$ lors des évolutions adiabatiques réversibles AB et CD : $\begin{cases} T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \\ T_D V_D^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T_A a^{\gamma-1} = T_B \\ T_D a^{\gamma-1} = T_C \end{cases}$

Ainsi, on obtient : $\eta_{th} = 1 - a^{1-\gamma}$

Si on dérive : $\frac{d\eta_{th}}{da} = -(1-\gamma)a^{-\gamma} = \frac{\gamma-1}{a^\gamma} > 0$

Le rendement est une fonction croissante de a, il faut augmenter le taux de compression pour augmenter η_{th} .

AN : Pour a = 9, $\eta_{th} = 0,54 = 54\%$

2.3. Rendement global $\eta = \eta_{th} \times \eta_{méca} = 0,40 = 40\%$

Sur 10L d'essence, seuls 4L produisent du travail.

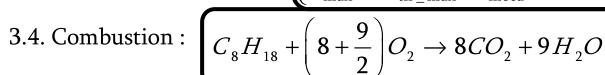
3.1. Gaz absorbé : $n = \frac{P_A C_V}{RT_A} = 80,2 \text{ mmol}$ (il en reste toujours

un peu, correspondant à V_{min} , on absorbe la différence C_V).

3.2. Point B : $\begin{cases} T_B = \frac{T_A V_A^{\gamma-1}}{V_B^{\gamma-1}} = T_A \cdot a^{\gamma-1} = 647,3 \text{ K} \\ P_B = \frac{P_A V_A^\gamma}{V_B^\gamma} = P_A \cdot a^\gamma = 19,4 \text{ bar} \end{cases}$

3.3 Si $T_{auto} = 430^\circ\text{C} = 703\text{K}$, alors $a_{max} = \sqrt[\gamma-1]{\frac{T_{auto}}{T_A}} = 11,4$

Et le rendement max : $\begin{cases} \eta_{th_max} = 1 - a^{1-\gamma} = 57,3\% \\ \eta_{max} = \eta_{th_max} \cdot \eta_{méca} = 43,0\% \end{cases}$



Il y a donc 1 mole d'octane pour $25/2 = 12,5$ moles d' O_2 , et donc pour $12,5/0,209 = 59,8$ moles d'air. A chaque injection, de n moles de gaz, $n_{oct} = n/(60,8) = 1,32\text{mmol}$, d'où une masse injectée : $m = n_{oct} \times M(C_8H_{18}) = 0,15\text{g}$

(Remarque : cela fait un pourcentage molaire de 1,64%)

(Remarque : cela fait un pourcentage massique de 6,15%)

3.5. Les mélanges peuvent être assimilés en première approximation à un même gaz parfait car il y a en majorité du N_2 dans les deux, à une pression qui reste faible (<50 bar). Le meilleur fonctionnement (rendement) du moteur est obtenu lorsque carburant et comburant constituent un mélange stœchiométrique car alors, tout le carburant est utilisé pour générer de l'énergie.

Remarque : la combustion incomplète pollue, notamment à l'origine de la production de CO (manque d' O_2 ...) qui est toxique, et d'autres polluants (suie, cendres, goudron, autres oxydes d'azotes ou d'hydrocarbures, ...).

3.6. On brûle à chaque explosion 0,15g, ce qui génère une chaleur $Q_{BC} = 6705 \text{ J} = \frac{nR}{\gamma-1} (T_C - T_B)$ (on approxime la

quantité totale de gaz par n), et

$$\begin{cases} T_C = T_B + Q_{BC} \frac{\gamma-1}{nR} = 4167 \text{ K} \\ P_C = P_B \cdot \frac{T_C}{T_B} = 124,9 \text{ bar} \end{cases}$$

Valeur anormalement élevée due au caractère idéal de ce qui a été considéré ici, combustion totale, octane pur, pas de pertes de chaleur, valeur calculées pour des molécules diatomiques, alors que beaucoup sont plus complexes...

3.7. 3500 tours/min → 1750 injections/min = 262,5g/min = 364,6mL/min = 21,9L/h = **19,9 L/100km**

Puissance développée : on sait que le rendement est de 40%, donc sur les 6,08mL/s consommés, 2,43mL/s produisent un travail, c'est-à-dire 1,75g/s, c'est-à-dire d'après le PCI, **$P = 78,2\text{kJ/s} = 78,2\text{kW} = 106,28 \text{ cv}$**

On obtient des valeurs d'un bon ordre de grandeur, mais un peu surévaluées, du fait que l'on suppose que le moteur est parfait et que l'on prend pas en compte tous les paramètres... De plus, 3500 tours/min pour aller à 110km/h avec un moteur de 2L signifie qu'il doit avoir une forte charge à tirer, d'où la valeur importante de la consommation en essence.

Exercice 2/3/4/5 : Calculs de rendements

→ Voir la correction sur la fiche distribuée

(Cycles de Carnot, Stirling, Beau de Rochas, Diesel, Brayton)

Remarque sur le moteur Diesel

Différence par rapport au moteur essence : Dans un moteur Diesel simple, la combustion du mélange air-combustible n'est pas provoquée par une étincelle (bougie), mais par auto-inflammation. Au dessus d'une certaine pression (et donc température), le mélange brûle spontanément. Il faut donc un taux de compression plus élevé. Dans un Diesel plus évolué, on comprime l'air seul, puis on ajoute par un injecteur du combustible au moment où l'air commence à se détendre (A_2A_3), donc combustion quasi-isobare. Le moteur Diesel est plus efficace que le moteur essence, et évite le phénomène d'auto-allumage qui handicape les moteurs essence (explosion du mélange avant la fin de la compression, d'où un cognement du moteur).