



# Cycles de moteurs à combustion interne



- Le cycle moteur 4 temps
- Cycle réel vs cycle thermodynamique
- Cycle Otto
- Cycle Diesel

Thermodynamique

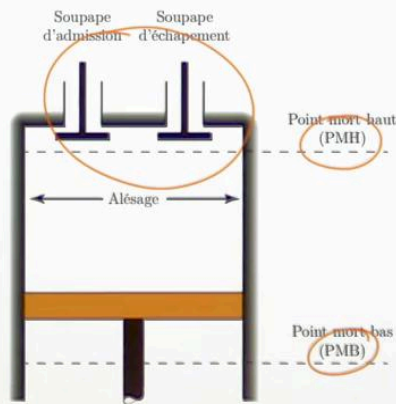
Bonjour et bienvenue au module sur les moteurs à combustion interne, plus précisément sur les moteurs à combustion interne de type piston cylindre. Il s'agit donc de cycles de puissance à gaz qui vise la production de travail mécanique à partir d'énergie thermique. Dans ce module, nous allons discuter principalement du cycle moteur à quatre temps et des hypothèses simplificatrices que nous devons apporter pour pouvoir passer du cycle mécanique réel au cycle thermodynamique qui se prête bien à l'analyse. Nous allons ensuite voir les différents types de moteurs de ces commentaires les plus couramment utilisés, c'est à dire les cycles auto et des cycles diesel, ainsi que les caractéristiques qui leur sont associées en termes de rendement en fonction des paramètres de design.

Notes

Summary



0m 04s



## • Paramètres importants

- Taux de compression

$$r = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}}$$

- Pression moyenne effective

$$PME = \frac{W_{net}}{V_{PMB} - V_{PMH}}$$

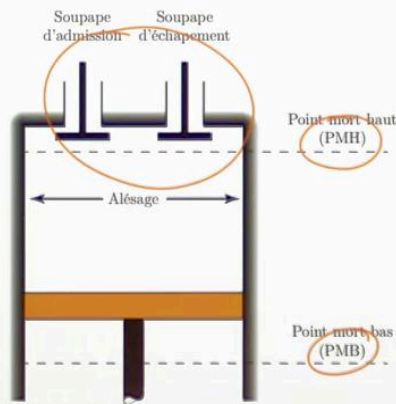
Thermodynamique

Commençons donc par certains concepts de base relatifs à tous les cycles des moteurs à explosion. Il s'agit de cycles fermés ou les évolutions du fluide de travail ont lieu dans un système. C'est. Le cylindre a un diamètre constant qui est appelé alésage. Dans celui ci se déplace un piston avec un mouvement de va et vient avec peu ou pas de friction. Le volume balayé par le piston entre le point mort bas et le point mort est appelé le déplacement. C'est le volume qui est généralement exprimé en litres qui nous donne une idée de la puissance des moteurs à combustion interne dans les voitures par exemple. Les échanges entre le système et son environnement. Les échanges de matières sont effectués au travers de soupapes. Qui sont situées en général à l'extrémité du piston. Une ou plusieurs d'entre elles laissent entrer l'air frais et les autres laissent s'échapper les gaz de combustion. Deux paramètres importants caractérisent la configuration. C'est tout d'abord le taux de compression qui est le ratio entre le volume au point mort bas sur le volume au point mort au. La deuxième permanente est la pression moyenne effective.

Notes

Summary





## • Paramètres importants

- Taux de compression

$$r = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}}$$

- Pression moyenne effective

$$PME = \frac{W_{net}}{V_{PMB} - V_{PMH}}$$

Thermodynamique

Il s'agit d'une valeur moyenne, comme son nom l'indique, du travail effectué divisé par la différence de volume entre le premier mois ou le premier mois en bas, ce qui permet de faire une approximation de la pression comme si elle était répartie uniformément durant toute la durée du cycle. Ces deux grandeurs permettent de comparer les cycles entre eux et sont utilisés pour calculer l'expression du rendement.

Notes

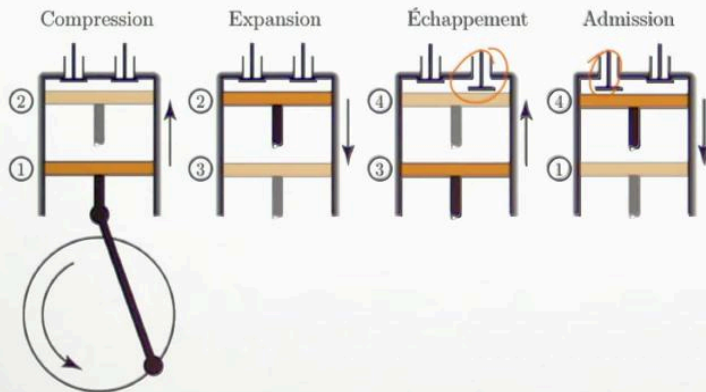
Summary



1m 47s

# Le cycle 4 temps

- 4 translations du piston dans le cylindre (2 tours par cycle)



Course	Fonction
1 - 2	Compression
2 - 3	Combustion/expansion
3 - 4	Échappement
4 - 1	Admission

Thermodynamique

Comme son nom l'indique, le cycle moteur quatre temps est composé de quatre révolutions successives, correspondant chacune à une translation du piston entre les points haut et bas. Ce mouvement de translation est ensuite converti en un mouvement de rotation de l'arbre du moteur par un assemblage de bielles manivelles. À chaque translation du piston correspond un demi tour de l'arbre qui fait par conséquent deux tours pour un cycle complet. La première course du piston, quand on supprime le fluide de travail en absorbant l'énergie provenant de l'arbre de l'arbre du moteur. Survient ensuite l'explosion qui est immédiatement suivie de la courbe d'expansion durant laquelle le travail du cycle est extrait. Pour la troisième course, la soupape d'échappement est ouverte. Et donc le mouvement du mouvement du piston va vidanger les gaz vicié vers l'extérieur du système. Finalement, la soupape d'échappement est fermée et la soupape d'admission est ouverte, si bien que la quatrième translation du piston va aspirer les gaz frais dans le cylindre. Les cicatrices sont largement utilisées, mais il existe aussi des cyclomoteurs ayant seulement deux ans.

Notes

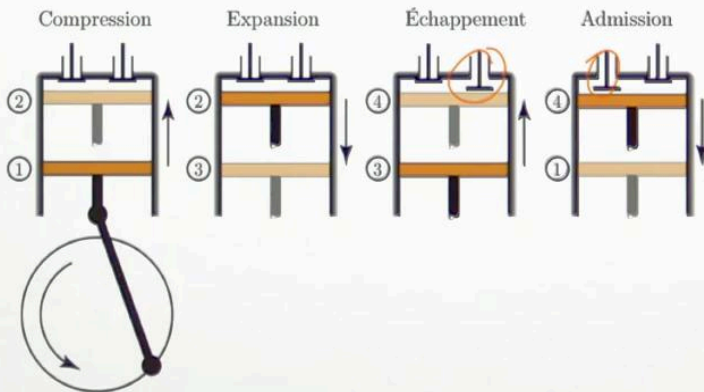
Summary



2m 08s

# Le cycle 4 temps

- 4 translations du piston dans le cylindre (2 tours par cycle)



Course	Fonction
1 - 2	Compression
2 - 3	Combustion/expansion
3 - 4	Échappement
4 - 1	Admission

Thermodynamique

Pour les cycles deux temps, les courses, l'échappement et d'admission sont remplacées par une injection des gaz vicié, presque simultanée à l'arrivée du gaz frais qui a été préalablement légèrement pressurisé. Pour ces cycles, il y a en général pas de soupapes et les conduits d'échange de gaz sont ouverts automatiquement par le passage du piston près du point mort bas.

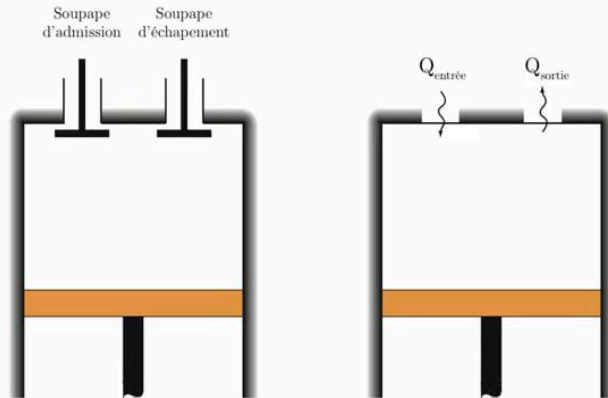
Notes

Summary





# Cycle réel vs cycle thermodynamique



- Hypothèses nécessaires pour permettre analyse thermodynamique
  1. Gaz parfait, air
  2. Évolutions intérieurement réversibles
  3. Combustion remplacée par transfert de chaleur
  4. Échappement remplacé par rejet de chaleur
  5. Capacité thermique constantes à 25°C

Thermodynamique

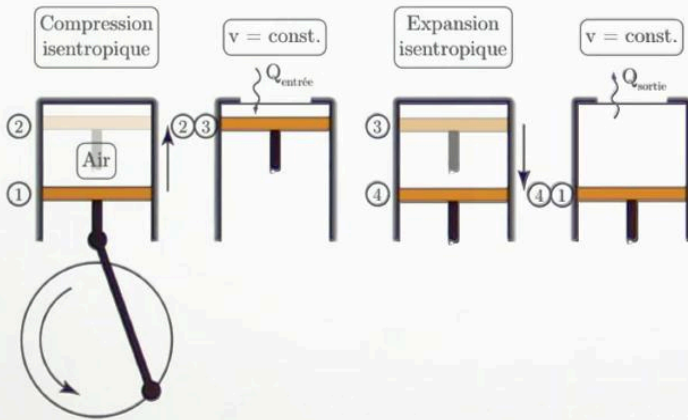
Les évolutions réelles du fluide dans un temps sont passablement complexes et pour pouvoir faire une analyse thermodynamique, c'est nécessaire de mettre en place un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. On va tout d'abord considérer qu'on travaille avec de l'air, de l'air, qu'on considère comme un gaz parfait. Ensuite, on va supposer que toutes les transformations qui font intervenir du travail, les compressions et les expansions vont se faire de manière réversible et adiabatique. Donc ça va être des transformations qui vont être entropique. L'abstraction la plus significative est de passer outre toutes les réactions chimiques et de remplacer les échanges de matière au travers des soupapes par des échanges de chaleur au travers d'une paroi. Finalement, on peut simplifier encore l'analyse en considérant que le fluide de travail a des capacités thermiques qui sont constantes, évaluées à 25 degrés Celsius. Les quatre premières simplifications constituent les hypothèses Bertrand Bar Tandis que quand on rajoute la cinquième, on parlera plutôt d'air froid standard commençant par la cycle auto qui est le cycle idéalisé pour les moteurs à pistons à allumage par étincelle.

Notes

Summary



# Cycle Otto



- Cycle idéalisé avec allumage par étincelle
- Apport de chaleur à volume constant
- Bilan d'énergie

$$q_{\text{entrée}} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{\text{sortie}} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{\text{entrée}}} = \frac{q_{\text{entrée}} - q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}} = 1 - \frac{q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Thermodynamique

Pour ces moteurs. Le fluide comprimé est un mélange à air combustible qui est allumé à l'aide d'une bougie quand le piston est près du point mort au. La température augmente donc très rapidement, essentiellement à volume constant. Le travail est ensuite extrait lors de la course d'expansion et les gaz viciés sont remplacés par un nouveau mélange. Lors des deux moteurs suivant, les évolutions du gaz dans le cycle mécanique réel sont passablement compliquées et se prêtent mal à l'analyse thermodynamique. Pour simplifier les choses, on va donc remplacer la course d'échappement et d'admission. Ici par. Un changement de température ou un apport de chaleur à volume constant. De plus, on ne parlera plus de combustion entre les étapes deux et trois, mais plutôt de la part de chaleur, cette fois ci encore à volume constant. On obtient donc un cycle simplifié qui se prête beaucoup mieux à l'analyse. Les quantités de chaleur entrantes et sortantes peuvent être calculées simplement par bilan entre les étapes deux et trois et les états quatre et un respectivement. Et si on applique les hypothèses d'air froid standard, ces quantités sont simplement égale à la capacité thermique à volume constant, multipliée par la différence de température.

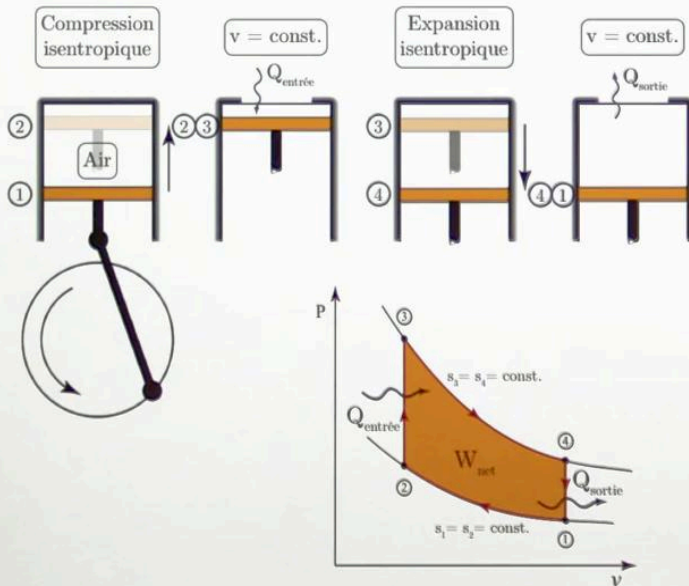
Notes

Summary





# Cycle Otto



- Cycle idéalisé avec allumage par étincelle

- Apport de chaleur à volume constant

- Bilan d'énergie

$$q_{\text{entrée}} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{\text{sortie}} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{\text{entrée}}} = \frac{q_{\text{entrée}} - q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}} = 1 - \frac{q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

- Compression et expansion isentropiques

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

Thermodynamique

On obtient donc une expression pour le rendement, qui dépend seulement des températures aux quatre points du cycle. Il est toutefois intéressant de réorganiser cette équation pour faire apparaître les ratios de température avant et après les phases de compression et d'expansion. Ces quantités sont pratiques parce qu'on peut les calculer à partir du rapport des volumes. Pour une évolution adiabatique et réversible. Elles sont aussi des entropie et donc on peut faire apparaître le taux de compression R dans l'expression du rendement.

Notes

Summary

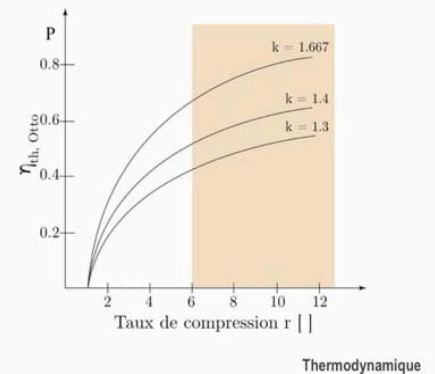


# Rendement du cycle Otto



- Rendement fonction du taux de compression seulement.

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\kappa-1}}$$



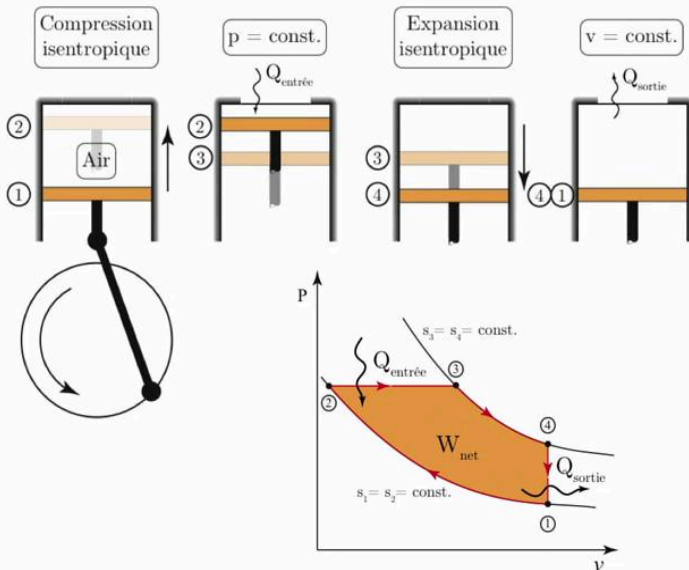
En fait, comme les volumes 1.2 et trois et au point quatre et un sont identiques, on obtient une expression pour le rendement du cycle auto, qui est seulement fonction du taux de compression  $R$  et du ratio de chaleur spécifique  $\kappa$ . Comme on travaille en général avec de l'air,  $\kappa$  vaut environ 1.4 et pour des taux de compression qui sont utilisés dans l'hémicycle auto, on obtient un rendement de l'ordre de 50 à 60 tel qu'illustré dans la figure. Par contre, on ne peut pas augmenter indéfiniment le taux de compression dans l'espoir d'augmenter le rendement. Si le taux de compression est trop élevé, on va assister au phénomène d'auto allumage. Dans le cylindre, on comprime un mélange d'air et de combustible. Si la température de ce mélange excède une certaine température, le mélange va s'enflammer avant même que la bougie ait le temps de fournir l'étincelle. Si cette enflammation spontanée a lieu avant que le piston soit arrivé au point mort, ça va avoir des conséquences désastreuses sur le rendement, ce qui limite les taux de compression utilisables pour les autos. Dans la plage d'environ 6 à 13.

Notes

Summary



# Cycle Diesel



- Cycle idéalisé pour moteurs à auto-allumage (par compression)
- Apport de chaleur à pression constante

Bilan d'énergie  
 $q_{\text{entrée}} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$

$q_{\text{sortie}} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$

$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{\text{entrée}}} = \frac{q_{\text{entrée}} - q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}} = 1 - \frac{q_{\text{sortie}}}{q_{\text{entrée}}}$

$\eta_{th} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{\kappa T_2(T_3/T_2 - 1)}$

- Compression et expansion isentropiques

$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\kappa-1} = \frac{T_4}{T_3}$   
 Thermodynamique

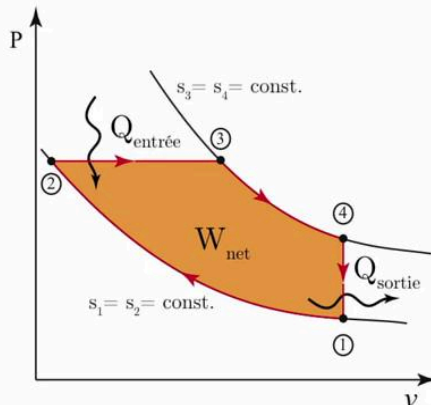
Dans les moteurs diesel, cette tendance naturelle à l'auto allumage des combustibles à haute température est utilisée pour s'affranchir de la nécessité d'avoir une bougie pour initier la combustion. Un cycle diesel en comprime l'air seulement et la combustion a lieu quand on injecte le combustible à haute pression et à haute température aux environs du point mort au. Comme tout le combustible ne peut être injecté instantanément, le piston a le temps de commencer à bouger vers le bas et on peut donc supposer que l'apport de chaleur ne se fait plus à volume constant, mais plutôt à pression constante. En appliquant à nouveau les hypothèses d'air froid standard, l'écorce, l'écorce de piston ou l'essentiel du travail a été changée sont à nouveau. Ils entrent à pic. Mais cette fois, la l'apport de chaleur se fait à pression constante plutôt qu'à volume constant. Et l'évacuation, elle, se fait toujours à volume constant. Dans l'expression du rendement, on calcule donc la chaleur qui entre avec CP et celle qui sort avec cv. On obtient donc une expression du rendement qui fait apparaître un terme additionnel qui provient du ratio CP sur cv qui a été introduit de cette manière. On peut à nouveau utiliser les relations entre pics pour lier les changements de volume aux changements de température entre les états un, deux et trois et quatre.

Notes

Summary



# Exemple : Cycle Diesel



$P_1 = 0.1 \text{ MPa}$
$T_1 = 300 \text{ K}$
$r = V_1/V_2 = 18$
$r_c = V_3/V_2 = 2$

- On considère que le fluide de travail est de l'air et qu'il se comporte comme un gaz parfait. En considérant  $C_p = 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  et  $C_v = 0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  comme variable, trouvez:

- Température et pression aux points 2, 3 et 4.
- Le rendement thermique du cycle
- La pression moyenne effective (PME)

Thermodynamique

Par contre, dans le cadre du cycle diesel, le volume à l'état trois n'est pas identique au volume à l'état deux. Donc on ne pourra pas avoir une expression de rendement qui fait seulement intervenir un seul taux de compression. Il faut faire intervenir, intervenir un autre paramètre qu'on va appeler le rapport d'injection le rapport entre les volumes aux points trois et au point deux. On obtient donc une expression pour le rendement qui dépend de R. Le taux de compression RC, le rapport d'injection et kappa, le ratio de chaleur spécifique pour les taux de compression typique des moteurs diesel compris entre quatorze et 23. Les rendements du cycle idéal varient donc entre 50 et 70 % et comme dans le cas du cycle auto, ce rendement augmente avec le taux de compression. Par contre, dans le cas du moteur diesel, ce rendement va diminuer si on augmente le rapport d'injection. La comparaison entre les cycles auto et diesel révèle qu'un taux de compression égale le cycle auto est plus efficace. Par contre, comme le taux de compression des moteurs diesel est beaucoup plus élevé que celui des moteurs auto en général, au final, les cycles diesel sont légèrement plus efficaces en terme de rendement.

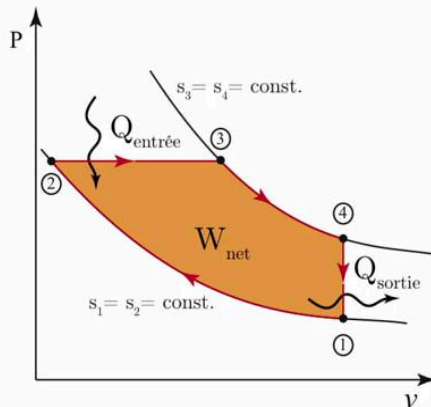
Notes

Summary



8m 27s

# Exemple : Cycle Diesel



$P_1 = 0.1 \text{ MPa}$
$T_1 = 300 \text{ K}$
$r = V_1/V_2 = 18$
$r_c = V_3/V_2 = 2$

- On considère que le fluide de travail est de l'air et qu'il se comporte comme un gaz parfait. En considérant  $C_p = 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  et  $C_v = 0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  comme variable, trouvez:

- Température et pression aux points 2, 3 et 4.
- Le rendement thermique du cycle
- La pression moyenne effective (PME)

Thermodynamique

Pour terminer, considérons l'exemple suivant soit un cycle diesel pour lequel on vous donne les conditions initiales, le taux de compression à égale D8 ainsi que le rapport d'injection. RC égale deux. L'analyse thermodynamique nécessite tout d'abord de déterminer tous les états. l'État deux sera calculé en considérant la compression isentropique intervenant entre les points un et deux avec R et Galvez un sur 22 pour de l'air. En considérant les capacités thermiques variables, on utilise les tables thermodynamiques et la température T2 est calculée à 898.3 Kelvin et une pression de 5390 kilos pascals. La température au point trois est ensuite calculée à partir de la loi des gaz parfaits avec V3 sur V2 égale deux et P3 égale P2. On obtient T3 égale 1 796.6. Pour l'étape quatre, on doit à nouveau utiliser une relation entropique pour trouver T4 à partir du rapport de volume V4 sur V3. Celui ci peut être calculé en multipliant V1 sur V2 par V2 sur V3. On trouve ainsi T4 égal à 884 kelvins et par hypothèse on a P4 égale T1. Le rendement du cycle peut ensuite être calculé en utilisant la définition qu'on a vu précédemment.

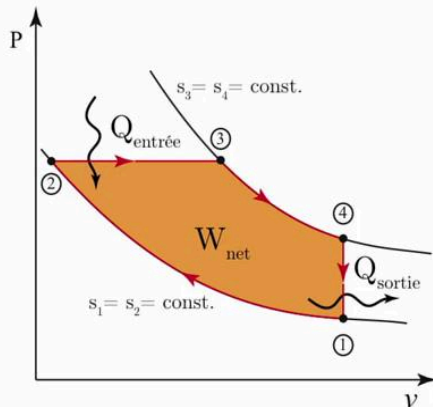
Notes

Summary





# Exemple : Cycle Diesel



$P_1 = 0.1 \text{ MPa}$
$T_1 = 300 \text{ K}$
$r = V_1/V_2 = 18$
$r_c = V_3/V_2 = 2$

- On considère que le fluide de travail est de l'air et qu'il se comporte comme un gaz parfait. En considérant  $C_p = 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$  et  $C_v = 0.718 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$  comme variable, trouvez:

- Température et pression aux points 2, 3 et 4.
- Le rendement thermique du cycle
- La pression moyenne effective (PME)

Thermodynamique

Donc un autre circuit, c'est à dire un moins la différence d'énergie interne plus quatre -1 divisé par la différence d'enthalpie H3 moins H2. Ce qui nous donne un rendement de 0,58 est un deux 58 pour un douze. Finalement, la pression moyenne effective est calculée comme étant. Le travail net divisé par le volume balayé par le piston. W net est simplement égal à la différence entre la chaleur acquise et celle cédée. La différence de volume entre le point haut et le point bas est quant à elle calculée à partir de la loi des gaz parfaits et du taux de compression un sur 22. Comme nous ne connaissons pas la taille du système et donc nous ne connaissons pas sa masse, le taux doit être calculé en grandeur spécifique, donc par unité de masse, pour obtenir un résultat de 760 kilos. Pascal.

Notes

Summary





# Conclusions



C'est ce qui conclut un module sur les cycles thermodynamiques des moteurs à combustion interne, plus précisément des moteurs à combustion interne de type piston cylindre. On a tout d'abord vu qu'il est nécessaire d'implémenter un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour passer du cycle mécanique réel complexe à un cycle thermodynamique simplifié qui se prête bien à l'analyse. On a ensuite passé en revue les deux principaux types de cycles de moteurs à combustion interne. Tout d'abord, le cycle auto ou la part de chaleur se fait à volume constant et l'allumage se fait par étincelle. Ensuite, on a parlé du cycle diesel ou la part de chaleur se fait à pression constante et l'allumage se fait par auto allumage. Finalement, en comparant ces deux cycles entre eux, on constate que dans les deux cas, le rendement du cycle augmente avec le taux de compression et que, à taux de compression égale, le rendement du cycle auto est légèrement supérieur au rendement du cycle diesel. Par contre, en prenant en compte les taux de compression qu'il est possible d'atteindre avec les moteurs diesel, celui ci est en général un rendement global légèrement supérieur au cycle auto. Merci.

Notes

Summary



11m 35s