

Thermodynamique

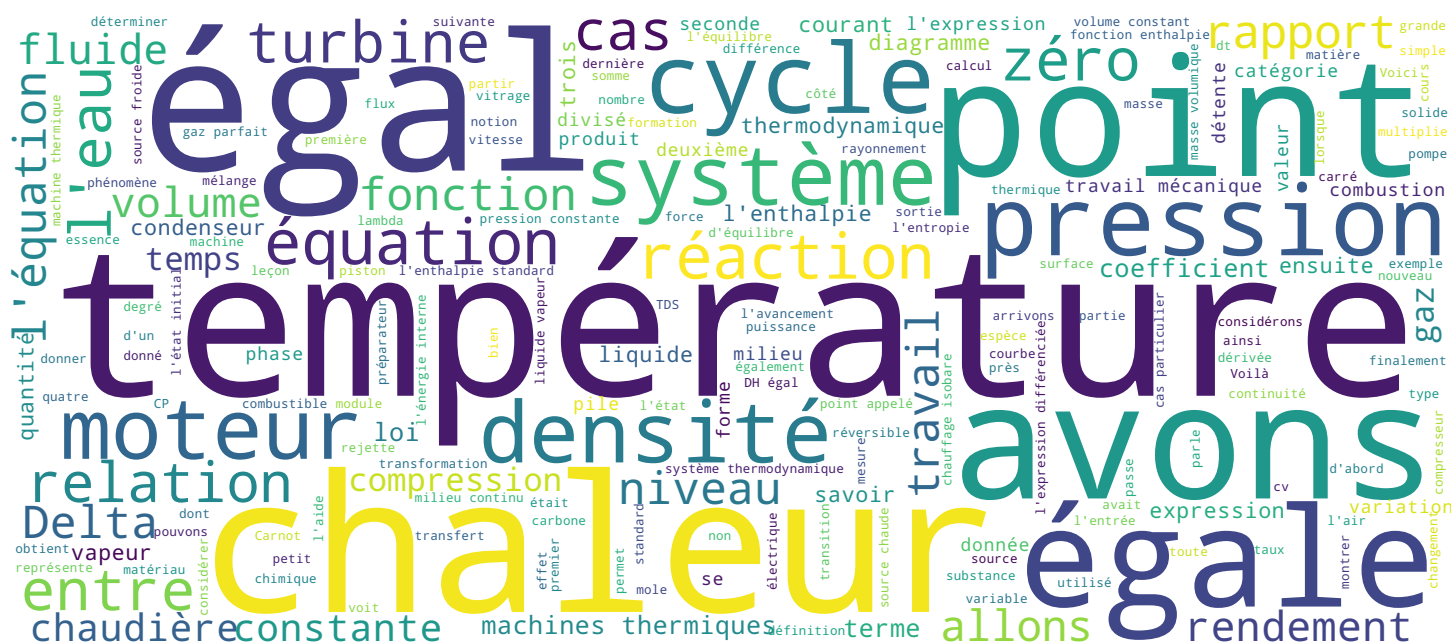
Introduction aux machines thermiques



Richard Mollier, 1863 - 1935



Ing. Dr André Talla, ENSP – Yaoundé - Cameroun



Search MOOC



Video



Contenu du module



- Quelques exemples des machines thermiques
- Définitions
- Catégories de machines thermiques
- Modes de combustion moteurs thermiques
- Rôle des fluides
- Cas machine thermique à vapeur

Thermodynamique

Bonjour à tous, je suis heureux de vous retrouver un nouveau coup. Récif de thermodynamique coordonné par l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne et relatif aux fluides. Aujourd'hui, nous allons porter notre attention aux moyens consacrés à l'introduction aux machines thermiques. Tout de suite, passons au sommaire de ce module. Pour fixer les idées. Nous commencerons par donner quelques exemples des machines thermiques. Puis nous donnerons deux définitions pour bien situer la machine thermique dans le champ de la thermodynamique. Le troisième point portera sur les différentes catégories de machines thermiques. Un mot sera ensuite dit sur le modèle de combustion. Pour le cas particulier des moteurs thermiques, le point suivant sera consacré au rôle que joue la fluides dans ces machines. Nous terminerons ce module en examinant le cas du fonctionnement d'une machine thermique à vapeur, passant à quelques définitions des machines thermiques, nous avons.

Notes

Summary



0m 05s

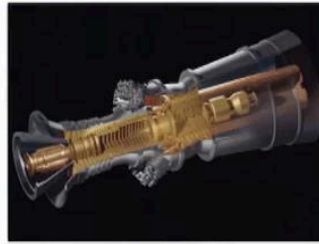
Quelques exemples des machines thermiques



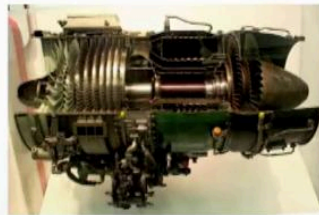
Moteur à essence



Moteur diesel



Turbine à gaz



Turboréacteur



Turbine à vapeur

Thermodynamique

Le moteur à essence encore appelé moteur à explosion. Dans ce moteur, le mélange carburant se fait dans un carburateur et la combustion est amorcée par une bougie. Le moteur diesel diffère du moteur à essence par l'absence du carburateur, des mélanges, des ingrédients de combustion ainsi que l'absence de la bougie d'allumage. Nous avons ensuite la turbine à vapeur actionnée par de la vapeur produite dans une chaudière à bois d'énergie calorifique. La turbine à gaz, quant à elle, est mise en mouvement grâce à l'énergie cinétique des gaz issus de la combustion du mélange carburant. Le dernier exemple concerne le turboréacteur utilisé dans les avions. Nous avons donné juste quelques exemples en notant que cette liste est loin d'être exhaustive.

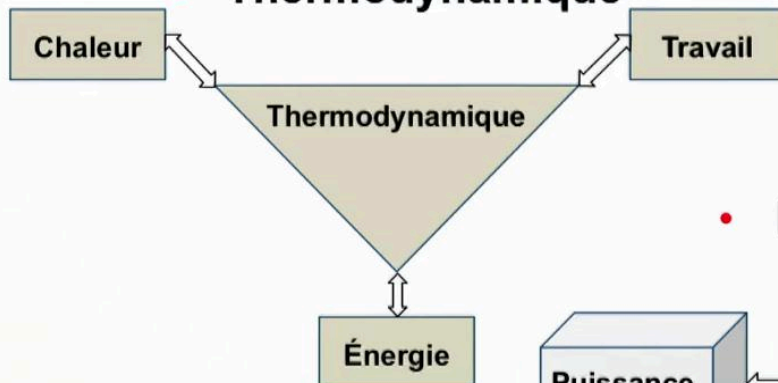
Notes

Summary

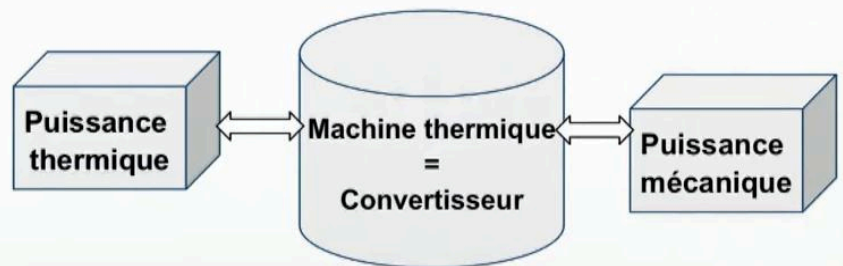


1m 16s

• Thermodynamique



• Machine thermique



Thermodynamique

Passons maintenant aux définitions. D'abord la thermodynamique. Il s'agit de ce domaine de la science qui établit les relations entre chaleur, travail et énergie. La machine permet quant à elle est un convertisseur d'une puissance thermique à une puissance mécanique ou vice versa.

Notes

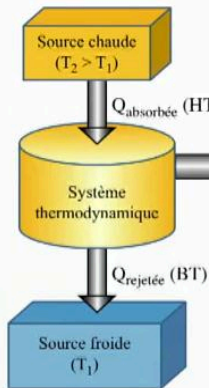
Summary



Catégories de machines thermiques



• Moteurs thermiques



Exemples

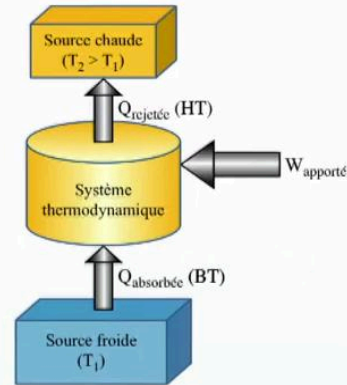
- Machines à vapeur (locomotives...)
- Moteurs à combustion (essence ou diesel)
- Centrales thermiques ou nucléaires (production d'électricité)

• Rendement

$$\eta = \frac{-W_{produit}}{Q_{absorbée}} < 1$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_{rejetée}}{Q_{absorbée}}$$

• Machines à transfert de chaleur



Thermodynamique

Ceci nous amène à catégoriser ces machines. Nous avons premièrement les moteurs thermiques. Ici, le système thermodynamique prélève de la chaleur à haute température à la source chaude. Une fraction de cette énergie calorifique est convertie en travail mécanique cédé à l'extérieur et l'autre fraction est rejetée à la source froide à basse température. Le rendement de ce moteur, qui est inférieur à un, est donné par. L'expression étant égale à moins de $W_{produit}$ sur $Q_{absorbée}$. C'est la chaleur reçue par le système et par convention est comptée positivement. Si les appliquant le premier principe de la thermodynamique, cette expression s'écrit encore, étant égale à un plus $Q_{rejetée}$ sur $Q_{absorbée}$. À titre d'exemple, dans cette catégorie de machines thermiques, nous citerons. Les machines à vapeur que l'on retrouve encore dans certaines locomotives, les moteurs à combustion soit à essence ou diesel. Les centrales thermiques ou nucléaires destinées à la production d'électricité. Comme deuxième catégorie.

Notes

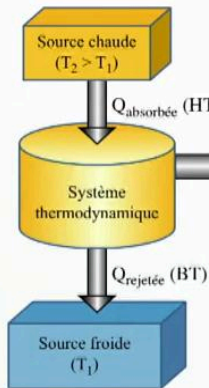
Summary



Catégories de machines thermiques



Moteurs thermiques



Exemples

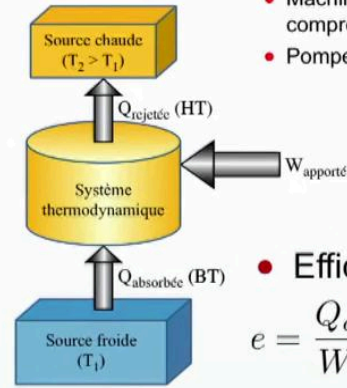
- Machines à vapeur (locomotives...)
- Moteurs à combustion (essence ou diesel)
- Centrales thermiques ou nucléaires (production d'électricité)

Rendement

$$\eta = \frac{-W_{produit}}{Q_{absorbée}} < 1$$

$$\eta = 1 + \frac{Q_{rejetée}}{Q_{absorbée}}$$

Machines à transfert de chaleur



Exemples

- Machines frigorifiques (à compression ou à absorption) ✓
- Pompes à chaleur ✓

Efficacité

$$e = \frac{Q_{absorbée}}{W_{apporté}} > 1$$

$$e = \frac{Q_{absorbée}}{- (Q_{absorbée} + Q_{rejetée})}$$

Thermodynamique

Nous avons la machine à transfert de chaleur dans cette catégorie du travail mécanique et fourni au système thermodynamique qui par conséquent prélève de la chaleur à la source froide à basse température et rejette la chaleur à la source chaude à haute température. L'efficacité d'une telle machine est donnée par. L'expression est égale à $Q_{absorbée}$ sur $W_{apporté}$ une fois de plus en appliquant le premier principe de la thermodynamique. Cette expression s'écrit égale à $Q_{absorbée}$ sur $- (Q_{absorbée} + Q_{rejetée})$. Comme exemple dans cette catégorie des machines thermiques, nous citerons les machines frigorifiques à compression ou à absorption et les pompes à chaleur.

Notes

Summary

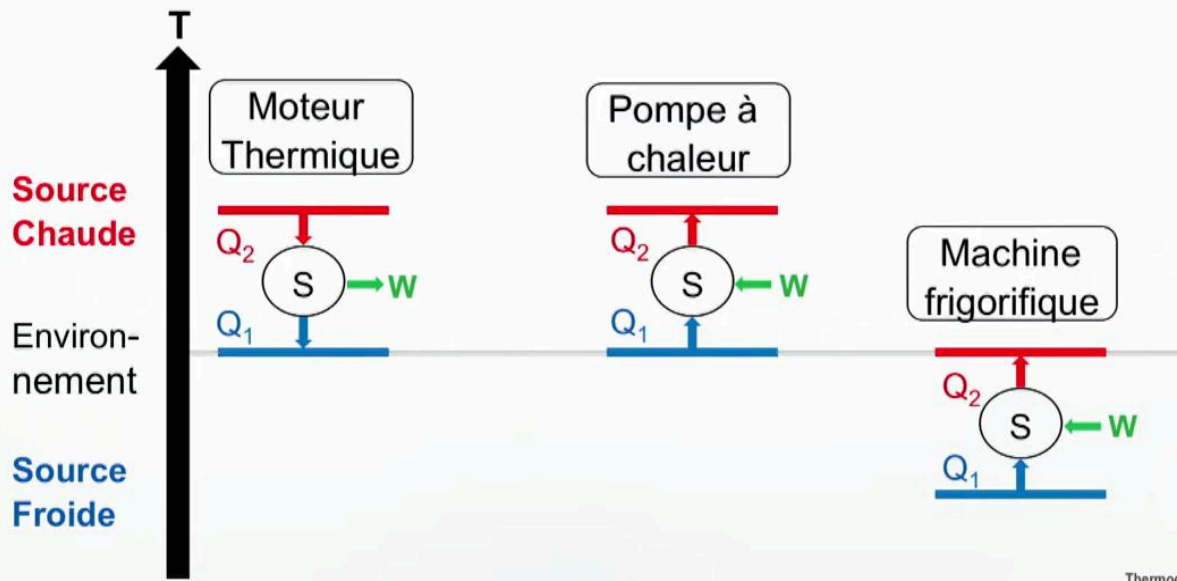


4m 06s

Catégories de machines thermiques



Vue d'ensemble machines thermiques dithermes



Thermodynamique

Ce schéma nous donne une vue d'ensemble des machines thermiques dans un moteur thermique. Le fluide thermodynamique prélève la chaleur à la source chaude, produit un travail mécanique W et rejette la chaleur à l'environnement extérieur. Dans une pompe à chaleur. Le système thermodynamique reçoit un travail mécanique préalable de la chaleur à l'environnement extérieur et rejette la chaleur à la source chaude. S'agissant de la machine frigorifique, le système thermodynamique reçoit un travail mécanique préalable de la chaleur à la source froide et rejette la chaleur à l'environnement extérieur.

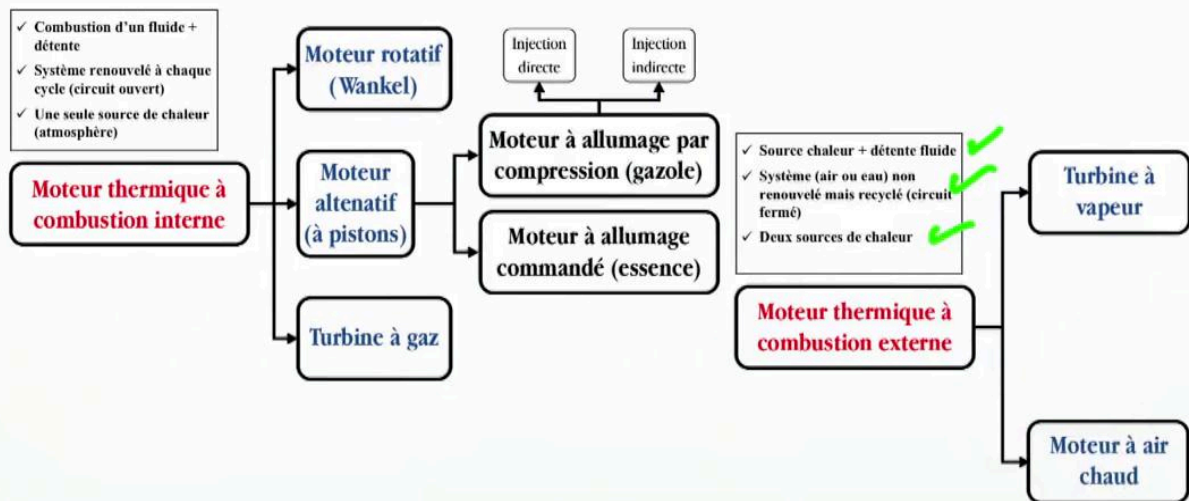
Notes

Summary



4m 58s

Modes de combustion moteurs thermiques



Thermodynamique

Place maintenant aux modèles de combustion pour le cas particulier des moteurs thermiques. Commençons d'abord par le moteur thermique à combustion interne. Sont concernés par cette catégorie de moteurs le moteur rotatif encore qualifié de Wankel, le moteur alternatif à pistons et la turbine à gaz. Si nous nous intéressons aux moteurs alternatifs et comprenons le moteur à allumage commandé ou le moteur à essence, le moteur à allumage par compression, au moteur diesel. Dans la catégorie des moteurs diesel, nous distinguons le moteur à injection directe et le moteur à injection indirecte. Notons que dans cette gamme de moteurs et à combustion d'un fluide suivi de la détente de ces derniers pour produire un travail mécanique, le système thermodynamique est renouvelé à chaque cycle. On parle du cycle ouvert. Le moteur fonctionne avec une seule source de chaleur qui est l'atmosphère. Nous avons ensuite la catégorie de moteurs à combustion externe. Sont concernés par ce type de moteur la turbine à vapeur et le moteur à air chaud. Notons que dans cette gamme de moteurs, il y a pas de chaleur et un effet de caloporteur suivi de la détente de ces derniers pour produire un travail mécanique. Le système thermodynamique peut être de l'air ou de l'eau. Notons que ce système n'est pas renouvelé mais recyclé. On parle alors de circuit fermé. Le moteur fonctionne avec deux sources de chaleur.

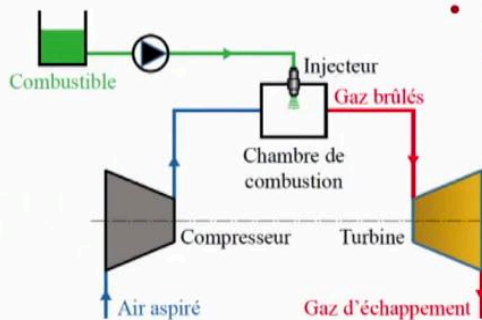
Notes

Summary



5m 41s

Rôle des fluides

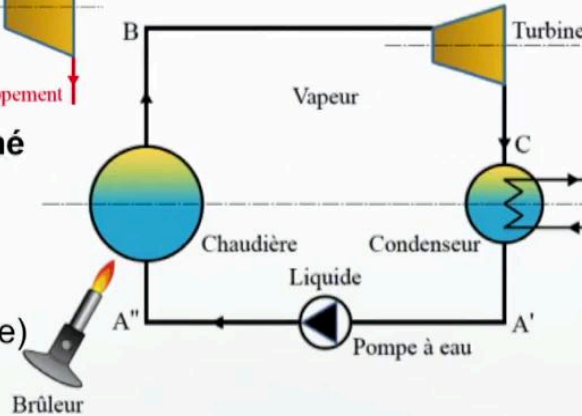


• Machines à cycle ouvert

- Combustion d'un mélange combustible-air puis détente des gaz dans la turbine et rejet de ces gaz à chaque cycle (exemple turbine d'avion)

• Machines à cycle fermé

- État final identique à l'état initial (exemple eau circuit primaire d'une centrale nucléaire)



• Parcours du fluide

- Succession de transformations (chauffage isobare, détente isentropique, compression adiabatique, condensation isobare) formant un cycle

Thermodynamique

Passons maintenant au rôle que pouvait jouer la thermodynamique appliquée. Commençons par les machines à cycle ouvert. Nous avons la chambre de combustion, alimentée d'une part par un réservoir à combustible par le biais d'une pompe et d'un injecteur. D'autre part, de l'air pulsé grâce à un compresseur. La turbine est alors actionnée par la détente des gaz brûlés. Les gaz sont ensuite rejetés à chaque cycle. C'est l'exemple d'une turbine d'avion. Pour ce qui est des machines à cycle fermé, nous avons la chaudière qui reçoit de la chaleur pour porter l'eau de l'état liquide à l'état vapeur. La turbine est ensuite actionnée par la détente de vapeur produite à l'étape suivante, c'est à dire au niveau du condenseur. Les vapeurs sont portées à l'état liquide, le liquide obtenu est ensuite refoulé à la chaudière au moyen d'une pompe. Les circulations ici, l'état final est identique à l'état initial. C'est l'exemple de l'eau du circuit primaire d'une centrale nucléaire. Comme parcours du fluide, dans l'un ou l'autre cas, le cycle est formé par une succession de transformations notamment. Un chauffage isobare, une détente isentropique, une compression adiabatique et une condensation isobare.

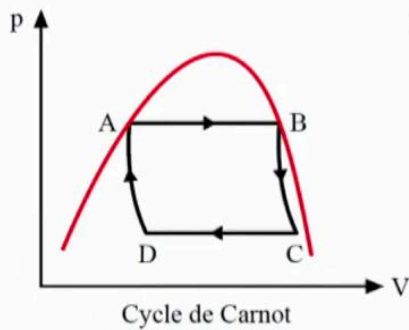
Notes

Summary



7m 41s

Du cycle de CARNOT au cycle de RANKINE



Cycle de CARNOT

- Cycle idéal de rendement $\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_C}$
- Cycle difficilement réalisable en pratique

Thermodynamique

Nous allons maintenant. Tel était le cas des machines thermiques à vapeur comme ainsi que de canaux d'ébauche au cycle de Rankine. D'abord le cycle de Carnot. Il est caractérisé par deux transformations isobares a, b et c, d et de transformation adiabatique. B, c et D à. Ce cycle est idéal avec un rendement est assez égal à un moins de F sur PC et F étant la température de la source froide et c'est la température de la source est chaude. Seulement, il est difficilement réalisable dans la pratique du fait que le titre de vapeur peut varier à l'état initial de l'étape de compression. C'est à dire. l'État des îles est par conséquent modifié en cycle de Rankine.

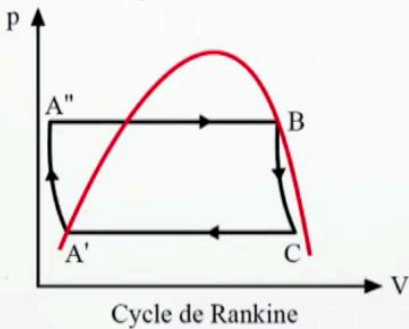
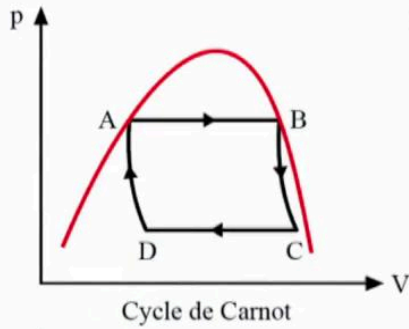
Notes

Summary



9m 24s

Du cycle de CARNOT au cycle de RANKINE



Cycle de CARNOT

- Cycle idéal de rendement $\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_C}$
- Cycle difficilement réalisable en pratique

Cycle de RANKINE

- Cycle de CARNOT avec compression du mélange liquide-vapeur (D à A), remplacée par une compression de liquide simple (A' à A'') puis un chauffage du liquide (A'' à A).
- Rendement pratique plus élevé du fait de substitution du compresseur par une simple pompe de circulation du liquide.

Thermodynamique

Jetant un coup d'œil sur le site du ranking pour obtenir les ranking. La compression du mélange liquide vapeur dans le cycle de Carnot est remplacée par une compression de l'équipe, le simple de prime à seconde. Puis le liquide comprimé subit un chauffage isobare de a seconde à b. Le rendement pratique est plus élevé du fait de la substitution du compresseur par une simple pompe de circulation du liquide.

Notes

Summary



10m 27s

Cas machine thermique à vapeur



Différentes transformations au cours du cycle de Rankine

- **Chaudière (transformation A''AB)**

Chauffage isobare (A''A) + évaporation isobare (AB) du liquide jusqu'à l'état de vapeur saturante en B ;

- **Turbine (Transformation BC)**

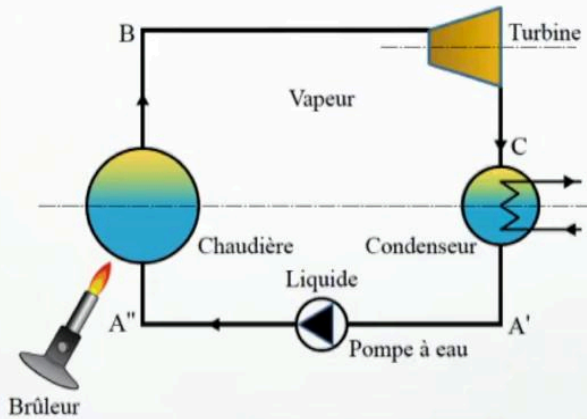
Détente isentropique de la vapeur saturante donnant du travail au milieu extérieur ;

- **Condenseur (Transformation CA')**

Liquéfaction totale du mélange liquide-vapeur au point A' ;

- **Pompe (Transformation A'A'')**

Rejet des condensats dans la chaudière et fermeture du cycle.



Thermodynamique

Nous allons maintenant traiter le cas des machines thermiques à vapeur. Examinons maintenant les différentes transformations du cycle au niveau de la chaudière. Nous avons un chauffage isobare de A'' à A , suivi d'une évaporation isobare du liquide jusqu'à l'état de vapeur saturante B au niveau de la turbine. Nous avons une détente isentropique de la vapeur saturante de B à C donnant du travail mécanique au milieu extérieur. S'agissant du condenseur, il assure la liquéfaction totale du mélange liquide-vapeur du point C au point A' appelé. Pour terminer, la pompe rejette le condensat dans la turbine et la fermeture du cycle.

Notes

Summary



11m 07s

Cas machine thermique à vapeur



Calculs des grandeurs usuelles

- Compression adiabatique du liquide à l'aide de la pompe (transformation A'A'')

$$W_C = \frac{p_{A''} - p_{A'}}{d\rho_e} = h_{A''} - h_{A'}$$

- Chauffage isobare du fluide dans la chaudière (transformation A''B)

$$Q_{ch} = h_B - h_{A''}$$

Preuve compression adiabatique du liquide

De la formule :

$$\begin{cases} dh = Tds + vdp \\ s = \text{const} \end{cases}$$

On a

$$dh = \delta W_C = vdp$$

et par intégration

$$W_C = \frac{p_{A''} - p_{A'}}{d\rho_e} = h_{A''} - h_{A'}$$

Thermodynamique

Voyons les calculs de quelques grandeurs. Gel d'abord, la compression adiabatique du liquide à l'aide de la pompe, c'est la transformation à la seconde. Le travail de la pompe est donné par l'expression W_C égal à la pression au point, à savoir moins la pression au point appelé, le tout divisé par la densité du fluide que multiplie la masse volumique de l'eau. Ce travail peut encore être obtenu par. L'enthalpie du point, à savoir taper du poing, appeler. Ou peuvent ils siffler des cris ? L'expression différenciée de la fonction enthalpie, à savoir. DH est égale à TDS plus élevée DP . La compression est adiabatique. Nous avons un S qui ne varie pas. Et finalement B est égal à ΔW_C qui est égal à VDB . On peut dans cette équation nous obtenons W_C égal à la différence de pression entre le point à savoir et le point à P . Le tout, divisé par la densité du fluide, peut multiplier la masse volumique de l'eau qui est encore égale à la différence d'enthalpie entre le point à seconde et le point appelé. Concernant le chauffage isobare dans la chaudière, la chaleur fournie au système est donnée par l'expression.

Notes

Summary



12m 03s

Cas machine thermique à vapeur



Calculs des grandeurs usuelles

- Compression adiabatique du liquide à l'aide de la pompe (transformation A'A'')

$$W_C = \frac{p_{A''} - p_{A'}}{d\rho_e} = h_{A''} - h_{A'}$$

- Chauffage isobare du fluide dans la chaudière (transformation A''B)

$$Q_{ch} = h_B - h_{A''}$$

Preuve compression adiabatique du liquide

De la formule :

$$\begin{cases} dh = Tds + vdp \\ s = \text{const} \end{cases}$$

On a $dh = \delta W_C = vdp$

et par intégration

$$W_C = \frac{p_{A''} - p_{A'}}{d\rho_e} = h_{A''} - h_{A'}$$

Preuve chauffage isobare du fluide

De la formule :

$$\begin{cases} dh = Tds + vdp \\ p = \text{const} \end{cases}$$

On a $dh = Tds = \delta Q_{ch}$

et par intégration

$$Q_{ch} = h_B - h_{A''}$$

Thermodynamique

Q au niveau de la chaudière, à la fin d'un tapis entre la sortie de la chaudière et l'entrée de cette dernière aux presses, nous écrivons à nouveau l'expression différenciée de la fonction enthalpie, à savoir égal à TDS plus élevée DP. Le chauffage est un isobare. La pression est égale à une constante. Nous arrivons dans un DH égal à TDS qui est égal à Delta Q Chaudière. L'intégration de cette équation nous conduit. Accus au niveau de la chaudière à différentes températures, le point à savoir est le point B.

Notes

Summary



13m 38s

Cas machine thermique à vapeur



- Détente adiabatique de la vapeur dans la turbine (transformation BC)

$$W_d = h_C - h_B$$

- Preuve détente adiabatique de la vapeur**

De la formule :

$$\begin{cases} dh = \delta Q + vdp \\ \delta Q = 0 \end{cases}$$

On a $dh = \delta W_d = vdp$

et par intégration $W_d = h_C - h_B$

- Liquéfaction isobare du fluide dans le condenseur (transformation CA')

$$Q_{cond} = h_{A'} - h_C$$

- Preuve condensation isobare du fluide**

De la formule :

$$\begin{cases} dh = Tds + vdp \\ p = \text{const} \end{cases}$$

Thermodynamique

Voyons ce qu'il en est lorsque la vapeur se détend. Adiabatique ment dans la turbine, c'est la transformation de baisser. Le travail résultant de cette détente est donnée par l'expression. W_d . À la différence d'un tapis entre le point C à la sortie de la turbine et le point B à l'entrée de cette dernière. Pour preuve, nous recourons une fois de plus à l'expression différenciée de la fonction enthalpie, à savoir $dh = \delta Q + vdp$. La transformation étant isotopique. δQ est égal à zéro. Nous obtenons. $dh = \delta W_d$ qui est égal à vdp . L'intégration de cette équation nous donne l'expression du travail fourni par la turbine, à savoir. W_d est égal à la différence d'enthalpie entre le point central de la turbine, le point B à l'entrée de cette dernière. Pour terminer, examinons la liquéfaction isobare du fluide dans le condenseur. C'est la transformation. C'est la chaleur cédée par le système au niveau du condenseur est donnée par l'expression condenseur et à la fin d'un tapis entre la sortie du condenseur, c'est à dire le point appelé et l'entrée du condenseur, c'est à dire le point C. Nous allons nous référer une fois de plus pour le prouver à l'expression différenciée de la fonction enthalpie, à savoir.

Notes

Summary



14m 23s

Cas machine thermique à vapeur



- Détente adiabatique de la vapeur dans la turbine (transformation BC)

$$W_d = h_C - h_B$$

- Preuve détente adiabatique de la vapeur**

De la formule :

$$\begin{cases} dh = \delta Q + vdp \\ \delta Q = 0 \end{cases}$$

On a $dh = \delta W_d = vdp$

et par intégration $W_d = h_C - h_B$

- Liquéfaction isobare du fluide dans le condenseur (transformation CA')

$$Q_{cond} = h_{A'} - h_C$$

- Preuve condensation isobare du fluide**

De la formule :

$$\begin{cases} dh = Tds + vdp \\ p = const \end{cases}$$

On a $dh = Tds = \delta Q_{Cond}$

et par intégration $Q_{cond} = h_{A'} - h_C$

Thermodynamique

DH. Est égal à VDB. La transformation se faisant à pression constante, nous arrivons à la DDS qui était un delta ku au niveau du condenseur. L'intégration de cette équation nous donne que condensat égal à H. AP ac ap étant la sortie du condenseur et c'est l'entrée du condenseur, penchons nous maintenant au rendement de ce moteur.

Notes

Summary



16m 10s

Cas machine thermique à vapeur



- Rendement du moteur thermique

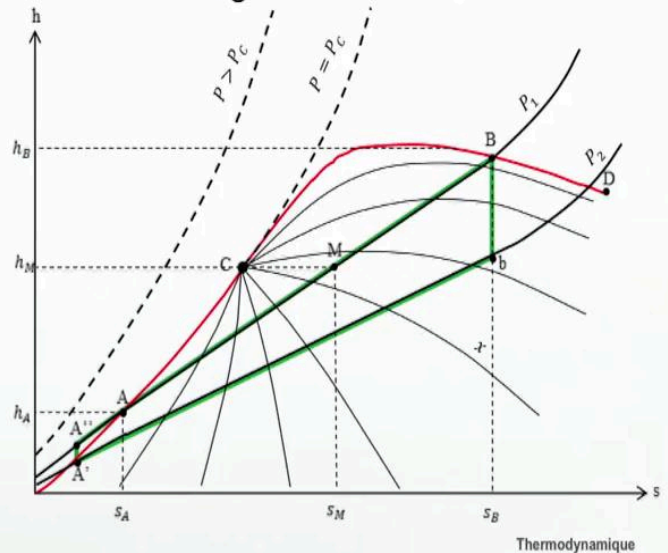
$$\eta = \frac{|W_d + W_C|}{Q_{ch}} = \frac{h_B - h_C - \left(\frac{p_{A''} - p_{A'}}{\rho_e} \right)}{h_B - h_{A''}}$$

- **Remarque**

Calculs des grandeurs usuelles \Rightarrow
connaissance valeurs de l'enthalpie aux
points caractéristiques du cycle

*Nécessité d'exploitation des
diagrammes ou des tables
thermodynamiques*

Tracé du cycle de Rankine dans le
diagramme de Mollier



Il est défini comme le rapport entre le travail net pris en valeur absolue et la chaleur fournie au système au niveau de la chaudière. On écrit dans. État est égal à la valeur absolue du travail de détente au niveau de la turbine. Plus le travail de compression au niveau de la pompe. Le tout divisé par la chaleur reçue par la chaudière. En remplaçant différents paramètres de cette expression par leur valeur, nous obtenons une expression finale du rendement du moteur qui s'écrit. État égal à HB, c'est l'enthalpie au point B moins associée. L'enthalpie au point est moins entre parenthèses la pression au point, à savoir la pression au point appelé le taux divisé par la densité du fluide comme multiplié la masse volumique de l'eau, tout cela divisé par la fin d'enthalpie entre le point B et le point A seconde. Nous pouvons remarquer que les calculs des grandeurs usuelles dans un modèle thermique nécessitent la connaissance des valeurs d'enthalpie aux points caractéristiques du cycle. Il y a donc nécessité d'exploitation des diagrammes ou des tables thermodynamiques. Ce schéma donne la représentation du cycle thermodynamique dans le diagramme de Mollier que nous reverrons au cours du dernier module de cette leçon.

Notes

Summary



Cas machine thermique à vapeur



- Rendement du moteur thermique

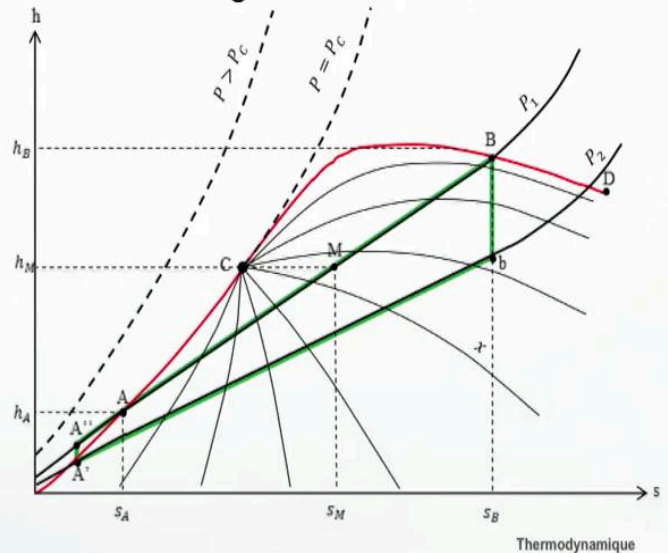
$$\eta = \frac{|W_d + W_C|}{Q_{ch}} = \frac{h_B - h_C - \left(\frac{p_{A''} - p_{A'}}{d\rho_e} \right)}{h_B - h_{A''}}$$

- **Remarque**

Calculs des grandeurs usuelles \Rightarrow
connaissance valeurs de l'enthalpie aux
points caractéristiques du cycle

Nécessité d'exploitation des diagrammes ou des tables thermodynamiques

Tracé du cycle de Rankine dans le diagramme de Mollier



En résumé, nous avons une composition isotopique au niveau de la pompe, suivie d'un chauffage et d'une évaporation isobare dans la chaudière. Au niveau de la turbine, il y a détente isotopique suivie de la condensation isobare dans le condenseur et le cycle est donc fermé.

- Notes

Summary



Conclusion



- Machine thermique : convertisseur d'énergie
- Deux catégories de machines thermiques : moteur et machine à transfert de chaleur
- Cycle de Rankine : plus pratique que le cycle de Carnot
- Expressions de calculs des grandeurs usuelles : différence d'enthalpie entre deux états d'équilibre

Thermodynamique

Nous noterons au terme de ce module qu'une machine thermique est un convertisseur d'énergie. Nous retiendrons également que nous avons deux catégories de machine thermique, à savoir le moteur et la machine à transfert de chaleur. Nous relèverons ensuite que le cycle de Rankine est plus pratique que le cycle de Carnot et enfin, nous noterons les expressions de calcul avec un gaz usuel que nous avons élaboré dans son module consacré à la production aux machines thermiques. À nous revoir bientôt !

Notes

Summary



18m 43s