

Machines thermiques

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Vendredi 20 mai 2022

Machines thermiques

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Vendredi 20 mai 2022

- ▶ « De tous temps les hommes » ont cherché à remplacer leur **travail** musculaire par d'autres sources :
 - ▶ travail animal → borné
 - ▶ vent (moulins, éoliennes), courants d'eau (moulins) → pas possible partout/tout le temps
- ▶ on dispose cependant d'autres sources d'énergie **thermique** :
 - ▶ chimique (combustions)
 - ▶ rayonnement solaire
 - ▶ nucléaire
- ▶ on peut récupérer du travail à partir de chaleur (explosion, soupape d'autocuiseur)
- ▶ la dissymétrie entre travail et transfert thermique (2^e principe) va limiter l'efficacité de cette conversion
- ▶ l'étude des machines thermiques (production de travail à partir de chaleur) au XIX^e (Sadi Carnot) a fondé la thermodynamique, en fournissant le premier énoncé du 2^e principe

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

1. Principe et modélisation

1.1 Fonctionnement cyclique

1.2 Classification des cycles et machines

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Système

- ▶ le système \mathcal{S} est un fluide dit **agent thermique** ou **fluide caloporteur** :
 - ▶ de l'air (moteur à combustion interne),
 - ▶ un fluide changeant d'état liquide/vapeur (réfrigérateurs et pompes à chaleur) : fréon CCl_3F ou d'autres alcanes halogénés, isobutane C_4H_{10}
- ▶ dans nos modèles \mathcal{S} évolue de manière **cyclique** pour permettre un fonctionnement en permanence
- ▶ \mathcal{S} reçoit sur un cycle :
 - ▶ des travaux W_i de sources idéales de travail : on pose $W_{\odot} \equiv \sum_i W_i$
 - ▶ des transferts thermiques Q_i de sources idéales de chaleur de températures T_i stationnaires

Variation des fonctions d'état sur un cycle

Variation des fonctions d'état sur un cycle

Les variations sur un cycle des **fonctions d'état** du système d'une machine thermique subissant des transformations **cycliques** sont **nulles**. On a donc :

$$W_{\circlearrowleft} + \sum_i Q_i = 0 \quad \Delta S_{\circlearrowleft} = 0$$

 $\Delta S_{\circlearrowleft} = 0$ n'implique pas la réversibilité puisque le système n'est **pas isolé**

1. Principe et modélisation

1.1 Fonctionnement cyclique

1.2 Classification des cycles et machines

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Moteur ou récepteur

Définition (Cycles moteurs/récepteurs)

- ▶ Un cycle parcouru par un système thermodynamique \mathcal{S} (nommé **agent thermique** ou **fluide caloporteur**) est dit **moteur** si le travail total W_{\odot} reçu par \mathcal{S} au cours du cycle est **négatif** $W_{\odot} < 0$: le système \mathcal{S} **fournit** du travail **au milieu extérieur**.
- ▶ Il est **récepteur** si $W_{\odot} > 0$: le système \mathcal{S} **reçoit** du travail **du milieu extérieur**.

Types de machines

Définition (Types de machines)

La machine thermique est un **moteur** si le **cycle est moteur**. Son rôle est de fournir du travail W à **l'extérieur**.

On distingue les machines à **cycle récepteur** suivant leur destination :

Fournir de l'énergie par transfert thermique Q à une source,

Prélever de l'énergie par transfert thermique Q d'une source.

▶ exemples de **moteur** :

▶ machine à vapeur, turbine de centrale électrique, moteur à air chaud (de Stirling)

▶  les moteurs à explosion sont des machines thermiques **ouvertes**

▶ exemples de **récepteurs**

▶ une pompe à chaleur, ou d'un radiateur **fournit** de l'énergie à une **source**

▶ une machine frigorifique **prélève** de l'énergie d'une source

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

on considère maintenant des systèmes **fermés** en fonctionnement **cyclique**

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

2.1 Inégalité de Clausius

2.2 Machines monothermes

2.3 Machines dithermes

2.4 Rendement d'un moteur ditherme

2.5 Récepteurs dithermes

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Inégalité de Clausius

Au cours d'un cycle, les transferts thermiques Q_i reçus par l'agent thermique \mathcal{S} des sources aux températures stationnaires T_i vérifient l'**inégalité** de Clausius :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} = -S_{c,\odot} \leq 0,$$

l'**égalité** étant réalisée pour un cycle idéal **réversible**.

on distingue les machines selon le **nombre** de sources thermiques qu'elles utilisent

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

2.1 Inégalité de Clausius

2.2 Machines monothermes

2.3 Machines dithermes

2.4 Rendement d'un moteur ditherme

2.5 Récepteurs dithermes

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Machine monotherme

Définition (Machine monotherme)

Une machine est dite **monotherme** si l'agent thermique \mathcal{S} ne reçoit qu'un seul transfert thermique Q_0 d'**une seule source** à la température T_0 .

Machine monotherme

Définition (Machine monotherme)

Une machine est dite **monotherme** si l'agent thermique \mathcal{S} ne reçoit qu'un seul transfert thermique Q_0 d'**une seule source** à la température T_0 .

Impossibilité du moteur monotherme

Une machine monotherme en fonctionnement cyclique est nécessairement un **récepteur cédant à l'extérieur**, sous forme de transfert thermique, l'intégralité de l'énergie qu'elle reçoit sous forme de travail.

Il est donc **impossible de réaliser un moteur monotherme** ; une machine thermique en fonctionnement cyclique doit utiliser **au minimum deux sources de transfert thermique** à des températures **différentes** pour avoir un comportement **moteur**.

Machine monotherme

Impossibilité du moteur monotherme

Une machine monotherme en fonctionnement cyclique est nécessairement un **récepteur cédant à l'extérieur**, sous forme de transfert thermique, l'intégralité de l'énergie qu'elle reçoit sous forme de travail.

Il est donc **impossible de réaliser un moteur monotherme** ; une machine thermique en fonctionnement cyclique doit utiliser **au minimum deux sources de transfert thermique** à des températures **différentes** pour avoir un comportement **moteur**.

- ▶ s'il existait, un moteur monotherme pourrait propulser un bateau dans l'arctique (source froide à 0°C) en y formant de la glace (pour y prélever de l'énergie)
- ▶ exemple de récepteur monotherme : un radiateur électrique reçoit un travail électrique $W_{\circ} > 0$ qu'il cède intégralement sous forme de transfert thermique $Q_{\circ} < 0$ à la pièce dont il maintient la

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

2.1 Inégalité de Clausius

2.2 Machines monothermes

2.3 Machines dithermes

2.4 Rendement d'un moteur ditherme

2.5 Récepteurs dithermes

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Définition

Définition (Machine ditherme)

Une machine est dite ditherme si l'agent thermique \mathcal{S} échange de l'énergie par transfert thermique avec deux sources à deux températures différentes $T_f < T_c$.

- ▶ T_f est la température de la source « froide » qui fournit Q_f à l'agent thermique \mathcal{S} ,
- ▶ T_c est la température de la source « chaude » qui fournit Q_c à l'agent thermique \mathcal{S} .

Diagramme de Raveau

Définition (Diagramme de Raveau)

Le **diagramme de Raveau** d'une machine thermique ditherme en contact avec des sources à T_f et T_c est le régionnement du plan Q_f, Q_c par les deux droites $Q_c(Q_f)$ représentant :

- ▶ l'une la nullité du travail sur un cycle,
- ▶ l'autre la nullité de l'entropie créée sur un cycle

réversible.

Le **point de fonctionnement** du cycle est le couple Q_f, Q_c .

- ▶ $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} = -S_{c,\odot} < 0$: droite $Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f$ ($|\text{pente}| > 1$) : demis-plans possible / impossible (2^e principe).
- ▶ $W_{\odot} = -(Q_c + Q_f)$: zones moteur/récepteur

Moteur ditherme

zone motrice : $W < 0$

Principe de Carnot

Pour décrire un cycle **moteur**, l'agent thermique d'une machine doit **recevoir**, par transfert thermique, de l'énergie d'une **source chaude** et en **fournir** à une **source froide**. Une partie de l'énergie thermique reçue ne pourra pas être convertie en travail moteur.

Moteur ditherme

zone motrice : $W < 0$

Principe de Carnot

Pour décrire un cycle **moteur**, l'agent thermique d'une machine doit **recevoir**, par transfert thermique, de l'énergie d'une **source chaude** et en **fournir** à une **source froide**. Une partie de l'énergie thermique reçue ne pourra pas être convertie en travail moteur.

- ▶ la machine ne peut pas convertir intégralement de l'énergie « désordonnée » en énergie « ordonnée »
- ▶ on peut récupérer une partie de l'énergie perdue pour chauffer des habitations par **cogénération** : des centrales électriques produisent aussi de la vapeur de chauffage

Récepteur utile

on cherche à faire plus utile qu'un simple radiateur monotherme qui convertit 100% du travail en transfert thermique : zone $Q_c < 0; Q_f > 0$

Récepteur utile

on cherche à faire plus utile qu'un simple radiateur monotherme qui convertit 100% du travail en transfert thermique : zone $Q_c < 0; Q_f > 0$

Définition (Récepteur utile)

Un récepteur est dit **utile** s'il **inverse le sens spontané** des transferts thermiques. On a alors :

- ▶ $Q_f > 0$: la source **froide fournit** de l'énergie thermique à l'agent thermique,
- ▶ $Q_c < 0$; l'agent thermique **fournit** de l'énergie thermique à la **source chaude**.

Rendement et efficacité

on va s'intéresser au **rendement** ou à l'**efficacité** (suivant les cas) qui désignera dans tous les cas :

$$\frac{\text{Énergie utilisée}}{\text{Énergie dépensée}} \quad \text{ce qu'on obtient} \\ \text{ce que ça coûte}$$

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

2.1 Inégalité de Clausius

2.2 Machines monothermes

2.3 Machines dithermes

2.4 Rendement d'un moteur ditherme

2.5 Récepteurs dithermes

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Théorème de Carnot

Définition (Rendement d'un cycle moteur)

Le rendement d'un cycle moteur ditherme est le rapport du travail fourni par cycle à l'extérieur, noté $-W_{\odot}$, et de l'énergie thermique fournie par cycle au système par la source chaude, notée Q_c :

$$r \equiv \frac{-W_{\odot}}{Q_c}.$$

Théorème de Carnot

Définition (Rendement d'un cycle moteur)

Le rendement d'un cycle moteur ditherme est le rapport du travail fourni par cycle à l'extérieur, noté $-W_{\odot}$, et de l'énergie thermique fournie par cycle au système par la source chaude, notée Q_c :

$$r \equiv \frac{-W_{\odot}}{Q_c}.$$

Théorème (de Carnot)

Le rendement d'un moteur ditherme est toujours inférieur au rendement dit « de Carnot » $r_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$, l'égalité étant réalisée pour un fonctionnement réversible.

Théorème de Carnot

Théorème (de Carnot)

Le rendement d'un moteur ditherme est toujours inférieur au rendement dit « de Carnot » $r_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$, l'égalité étant réalisée pour un fonctionnement réversible.

- ▶ r_C est d'autant plus grand que $T_c \gg T_f$
- ▶ centrale refroidie par une rivière $T_f = 280\text{K}$ et $T_c \approx 600\text{K}$, soit $r_c \approx 53\%$
- ▶ on ne dépasse cependant pas 35%

Réalisation : cycle de Carnot

Définition (Cycle de Carnot)

Un cycle de Carnot est nécessairement un cycle **réversible** composé de deux **isothermes** et de deux **adiabatiques**.

Exercice : représentations d'un cycle de Carnot

Diagramme entropique

On représente l'évolution du fluide d'un moteur ditherme au cours d'un cycle de Carnot en coordonnées T, S (abscisse S , ordonnée T)

- 1 Montrer qu'il s'agit d'un rectangle.
- 2 Que représente le produit TdS pour une transformation réversible. En déduire une lecture graphique de $Q_c + Q_f$ sur le cycle.
- 3 En déduire le sens de parcours du cycle et une lecture graphique du travail $-W_{\odot}$ fourni.

Exercice : représentations d'un cycle de Carnot

Diagramme de Clapeyron

On représente maintenant dans les coordonnées de Clapeyron (P, V) le cycle de Carnot parcouru par un **gaz parfait**.

- 1 Rappeler les équations en coordonnées de Clapeyron de l'isotherme et de l'isentropique passant par P_1, V_1 en fonction de P_1, V_1 et γ , supposé constant.
- 2 En déduire l'allure du cycle. On comparera les pentes d'une isotherme et d'une adiabatique réversible en un même point du diagramme.
- 3 Dans quel sens doit-il être parcouru pour que le cycle soit moteur ? Déterminer une lecture graphique du travail $-W_{\odot}$ fourni par cycle.

Correction

Diagramme entropique 1 2 isoS, 2 isoT,

2 $TdS = Q$ sur une rev, $Q_1 + Q_2 = \pm$ aire du cycle

3. sens horaire, $-W_{\odot} = Q_1 + Q_2$

Diagramme de Clapeyron 1 $P_1 V_1 = cste$ $P_1 V_1^\gamma = cste$.

2 2 branches d'hyperboles, 2 plus pentues. En effet :

$$dPV^\gamma / (PV^\gamma) = \frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 : \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_S = -\gamma \frac{P}{T} = -\gamma \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T.$$

3 $-W_{\odot} = \oint PdV =$ aire du cycle parcouru en sens horaire.

Exercice : Turbine à gaz et cogénération

On considère une turbine produisant de l'énergie électrique à partir de la combustion de gaz naturel (principalement du méthane CH_4). On la modélise comme un moteur ditherme suivant un cycle de Carnot dont la température de la source chaude est celle dans la chambre de combustion $T_c = 1200^\circ\text{C}$ et celle de la source froide est celle des gaz d'échappements à $T_f = 15^\circ\text{C}$.

- 1 Calculer l'efficacité de Carnot de cette machine. Quelle puissance thermique serait fournie à la source froide si la turbine fournit une puissance électrique de 100kW ?
- 2 Le cycle est en fait composé de deux isentropiques et de deux isobares. Tracer son allure en coordonnées T, s et en diagramme de Clapeyron. Est-ce un cycle de Carnot ? On mesure un rendement de $\rho = 0,3$. Commenter.
- 3 On souhaite récupérer l'énergie thermique à la source froide pour alimenter, par **cogénération**, un système d'eau chaude sanitaire. Définir l'efficacité de l'installation globale et calculer sa valeur. Dépend-elle du caractère idéal du cycle ?

Turbine à gaz : correction

- 1 $e = 1 - T_f/T_c = 0,84$. On fournit $P_f = P_e * (1 - e)/e = 20\text{kW}$.
- 2 Rendement plus faible car les isobares ne sont pas isothermes : on n'a pas un cycle de Carnot.
- 3 Tout P_c est récupérée ; pour le chauffage ou pour l'alternateur. On a donc une efficacité de 1. On aura cependant des pertes dues au chauffage de l'air ambiant par défaut d'isolation thermique ; du fait que la conversion mécanique électrique n'aura pas un rendement de 100%.

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

2.1 Inégalité de Clausius

2.2 Machines monothermes

2.3 Machines dithermes

2.4 Rendement d'un moteur ditherme

2.5 Récepteurs dithermes

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

Cycle inverse

- ▶ les signes de tous les échanges d'énergie sont opposés : on peut formellement le décrire comme un cycle moteur parcouru en sens inverse

+ $W_{\odot} \geq 0$: il faut du travail pour réchauffer le chaud ($Q_c < 0$) avec le froid ($Q_f > 0$)

- ▶ on parle d'**efficacité** et pas de rendement car le rapport $\frac{\text{Énergie utile}}{\text{Énergie dépensée}}$ peut être > 1 ici

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Réfrigérateur 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Réfrigérateur

- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
- 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Réfrigérateur

- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
- 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
- 3 Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter.
Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

Réfrigérateur

- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
- 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
- 3 Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter.
Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

- Réfrigérateur**
- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
 - 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
 - 3 Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter.
Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?
- Pompe à chaleur**
- 1 Définir l'efficacité e_p d'une pompe à chaleur.

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

- Réfrigérateur**
- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
 - 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
 - 3 Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter.
Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?
- Pompe à chaleur**
- 1 Définir l'efficacité e_p d'une pompe à chaleur.
 - 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'une pompe à chaleur domestique.

Exercice : Efficacité de récepteurs dithermes

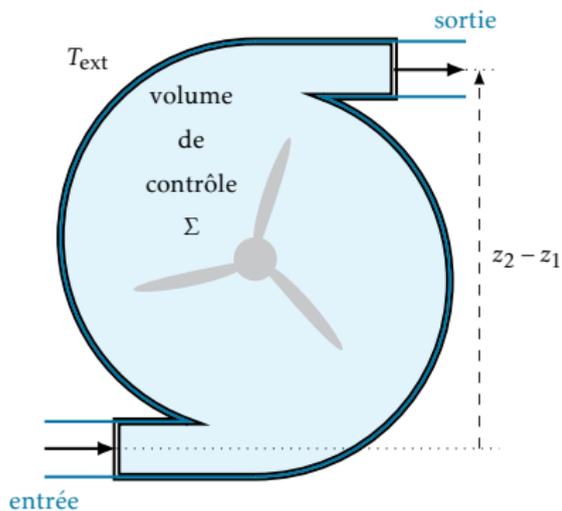
- Réfrigérateur**
- 1 Définir l'efficacité e_f d'un réfrigérateur.
 - 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'un réfrigérateur domestique.
 - 3 Peut-elle être supérieure à 1 ? Commenter.
Peut-on par ailleurs atteindre une température nulle avec une telle machine ?
- Pompe à chaleur**
- 1 Définir l'efficacité e_p d'une pompe à chaleur.
 - 2 Déterminer sa valeur maximale en fonction de T_c et T_f . A.N. pour les valeurs usuelles d'une pompe à chaleur domestique.
 - 3 Pourquoi est-elle supérieure à 1 ? Comparer à celle d'un simple radiateur électrique.

1. Principe et modélisation
2. Conséquences du 2^e principe
- 3. Premier principe industriel en écoulement permanent**
4. Modélisation de machines réelles

1. Principe et modélisation
2. Conséquences du 2^e principe
- 3. Premier principe industriel en écoulement permanent**
 - 3.1 Système ouvert en écoulement permanent**
 - 3.2 Nouvelle formulation du premier principe
4. Modélisation de machines réelles

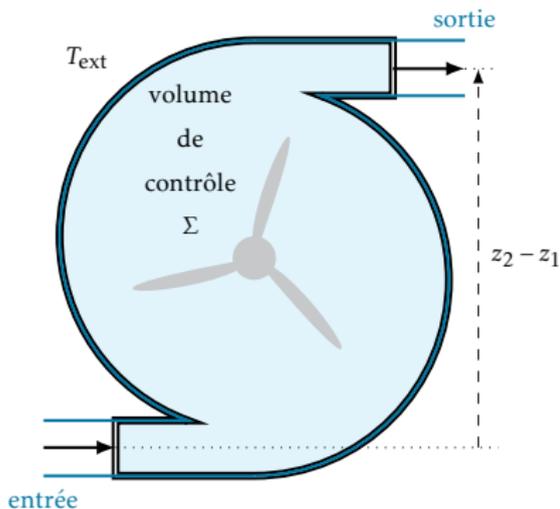
Présentation

- ▶ on a toujours travaillé sur des systèmes **fermés**

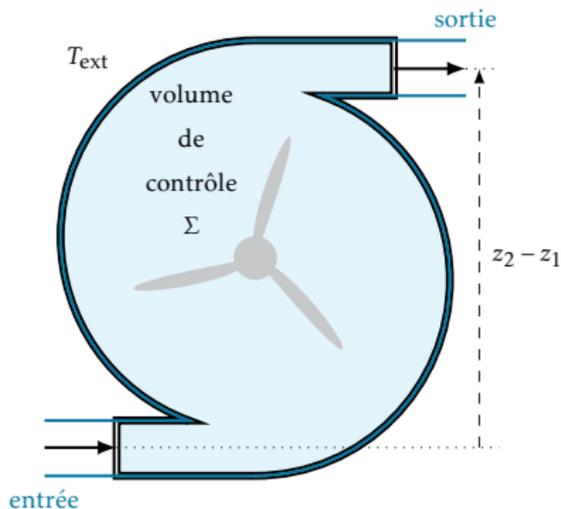


Présentation

- ▶ on a toujours travaillé sur des systèmes **fermés**
- ▶ dans toute machine, chaque organe (compresseur, piston, détenteur) constitue un **système ouvert**

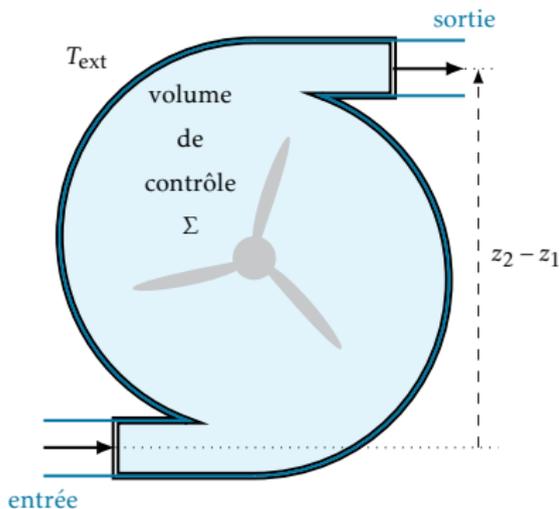


Présentation



- ▶ on a toujours travaillé sur des systèmes **fermés**
- ▶ dans toute machine, chaque organe (compresseur, piston, détenteur) constitue un **système ouvert**
- ▶ certaines machines sont des systèmes ouverts (turboréacteur d'avion)

Présentation



- ▶ on a toujours travaillé sur des systèmes **fermés**
- ▶ dans toute machine, chaque organe (compresseur, piston, détenteur) constitue un système **ouvert**
- ▶ certaines machines sont des systèmes ouverts (turboréacteur d'avion)
- ▶ on veut étudier les variations de T, P, h, u, v du fluide à la traversée de l'organe, en fonction du **transfert thermique q et du travail w massiques qu'il y**

Volume de contrôle

Définition (Volume de contrôle)

Un **volume de contrôle**, noté Σ , est une zone de l'espace délimitée par une surface **fermée invariable**.

- ▶ **géométriquement** fermé mais pas complètement **physiquement** fermé : il faut au moins un trou d'entrée (**admission**) et un de sortie (**refoulement**)
- ▶ le fluide en écoulement traverse Σ
- ▶ indices 1 pour ce qui rentre, 2 pour ce qui sort, Σ pour ce qui à l'intérieur

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

► en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S
 - ▶ c la composante **orthogonale** à la surface de la vitesse **macroscopique**

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S
 - ▶ c la composante **orthogonale** à la surface de la vitesse **macroscopique**
 - ▶ masse volumique du fluide ρ : $\rightarrow D = \rho c S$

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S
 - ▶ c la composante **orthogonale** à la surface de la vitesse **macroscopique**
 - ▶ masse volumique du fluide ρ : $\rightarrow D = \rho c S$
 - ▶ tous ces paramètres peuvent varier le long de l'écoulement

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S
 - ▶ c la composante **orthogonale** à la surface de la vitesse **macroscopique**
 - ▶ masse volumique du fluide ρ : $\rightarrow D = \rho c S$
 - ▶ tous ces paramètres peuvent varier le long de l'écoulement
- ▶ D et pas d ; c et pas v pour éviter les confusions

Débit de masse

Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit δm la masse de fluide traversant la section pendant une durée infinitésimale dt . On définit le **débit de masse**, noté D , à travers la section par :

$$D = \frac{\delta m}{dt}.$$

- ▶ en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
- ▶ expression de D :
 - ▶ surface d'aire S
 - ▶ c la composante **orthogonale** à la surface de la vitesse **macroscopique**
 - ▶ masse volumique du fluide ρ : $\rightarrow D = \rho c S$
 - ▶ tous ces paramètres peuvent varier le long de l'écoulement
- ▶ D et pas d ; c et pas v pour éviter les confusions
- ▶ on néglige les variations des paramètres dans une section de

Machine en écoulement permanent

les machines qu'on utilise doivent fonctionner en permanence en reproduisant le même cycle

Définition (Écoulement permanent)

Une machine thermique est en **écoulement permanent** (ou **stationnaire**) si les paramètres d'état du fluide et des différents organes en tout point sont **stationnaires**.

Machine en écoulement permanent

les machines qu'on utilise doivent fonctionner en permanence en reproduisant le même cycle

Définition (Écoulement permanent)

Une machine thermique est en **écoulement permanent** (ou **stationnaire**) si les paramètres d'état du fluide et des différents organes en tout point sont **stationnaires**.

- ▶ $P(M_a)$ et $P(M_b)$ ne varient pas avec t mais on peut avoir $P(M_a) \neq P(M_b)$
- ▶ une portion de fluide décrit un cycle thermodynamique puisqu'elle revient cycliquement dans le même état

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

3.1 Système ouvert en écoulement permanent

3.2 Nouvelle formulation du premier principe

4. Modélisation de machines réelles

Expression

Premier principe industriel

Pour un fluide dans un écoulement **stationnaire** :

- ▶ le débit massique est **uniforme**,
- ▶ le premier principe s'écrit, entre deux points de l'écoulement :

$$\Delta\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right) = w_u + q,$$

avec :

- ▶ c et z respectivement la vitesse macroscopique et l'altitude du fluide aux points considérés, g l'accélération de la pesanteur
- ▶ w_u le travail massique dit **utile**, autre que celui exercé par le reste du fluide reçu par le fluide entre les deux points,
- ▶ q le transfert thermique massique reçu par le fluide entre les deux points.

Expression

Expression

- ▶ le plus souvent, Δgz négligeable, $\Delta c^2/2$ négligeable sauf pour un turboréacteur

Expression

- ▶ le plus souvent, Δgz négligeable, $\Delta c^2/2$ négligeable sauf pour un turboréacteur
- ▶ on a aussi, à chaque instant, en utilisant les puissances thermique \mathcal{P}_t et mécanique utile \mathcal{P}_u

$$D\Delta\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right) = \mathcal{P}_t + \mathcal{P}_u$$

Expression

- ▶ le plus souvent, Δgz négligeable, $\Delta c^2/2$ négligeable sauf pour un turboréacteur
- ▶ on a aussi, à chaque instant, en utilisant les puissances thermique \mathcal{P}_t et mécanique utile \mathcal{P}_u

$$D\Delta\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right) = \mathcal{P}_t + \mathcal{P}_u$$

- ▶ w_u est le travail dû aux pièces mobiles des organes traversés par le fluide, l'utilisation de h permet d'éliminer le travail de transvasement qui ne contribue pas aux échanges énergétiques avec l'extérieur

Organes caractéristiques

Lexique

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

Turbine pièce mise en rotation par une vapeur, échange un **travail utile** avec le fluide. Dans les turboréacteurs ($w_u > 0$), les centrales électriques ($w_u < 0$).

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

Turbine pièce mise en rotation par une vapeur, échange un **travail utile** avec le fluide. Dans les turboréacteurs ($w_u > 0$), les centrales électriques ($w_u < 0$).

Échangeur thermique variation de T par transfert thermique avec une source de chaleur ou un autre écoulement; cas particuliers :

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

Turbine pièce mise en rotation par une vapeur, échange un **travail utile** avec le fluide. Dans les turboréacteurs ($w_u > 0$), les centrales électriques ($w_u < 0$).

Échangeur thermique variation de T par transfert thermique avec une source de chaleur ou un autre écoulement; cas particuliers :

- ▶ **évaporateur** pour vaporiser un mélange liquide-vapeur dans frigo/PAC, **bouilleur** dans une machine à vapeur

Organes caractéristiques

Lexique

Compresseur augmente la pression d'un **gaz**, utilisé dans frigo/PAC et turbines à gaz

Pompe augmente la pression d'un **liquide** pour le faire circuler, utilisée dans la machine à vapeur

Vanne de détente robinet ou obstacle rencontré par le fluide pour diminuer sa pression

Turbine pièce mise en rotation par une vapeur, échange un **travail utile** avec le fluide. Dans les turboréacteurs ($w_u > 0$), les centrales électriques ($w_u < 0$).

Échangeur thermique variation de T par transfert thermique avec une source de chaleur ou un autre écoulement; cas particuliers :

- ▶ **évaporateur** pour vaporiser un mélange liquide-vapeur dans frigo/PAC, **bouilleur** dans une machine à vapeur
- ▶ **condenseur** pour le liquéfier

Organes caractéristiques

En fonctionnement idéal :

organe	w_u	q
compresseur	> 0	0
pompe	> 0	0
vanne	0	0
turbine	< 0	0
évaporateur	0	> 0
condenseur	0	< 0

1. Principe et modélisation
2. Conséquences du 2^e principe
3. Premier principe industriel en écoulement permanent
4. Modélisation de machines réelles

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

4.1 Moteur à explosion

4.2 Moteur en écoulement permanent : la machine à vapeur

4.3 Cycles récepteurs en écoulement permanent

Principe et cycle

- ▶ $Q_c > 0$ est apporté par la combustion d'un mélange carburant et oxygène (descriptible aussi comme une variation d'énergie interne associée à la réaction chimique)

Principe et cycle

- ▶ $Q_c > 0$ est apporté par la combustion d'un mélange carburant et oxygène (descriptible aussi comme une variation d'énergie interne associée à la réaction chimique)
- ▶ le travail $-W_{\odot} > 0$ est fourni aux roues par un piston repoussé par la détente du mélange

Principe et cycle

- ▶ $Q_c > 0$ est apporté par la combustion d'un mélange carburant et oxygène (descriptible aussi comme une variation d'énergie interne associée à la réaction chimique)
- ▶ le travail $-W_{\odot} > 0$ est fourni aux roues par un piston repoussé par la détente du mélange
- ▶ le transfert thermique $-Q_f > 0$ est cédé à l'air extérieur

Principe et cycle

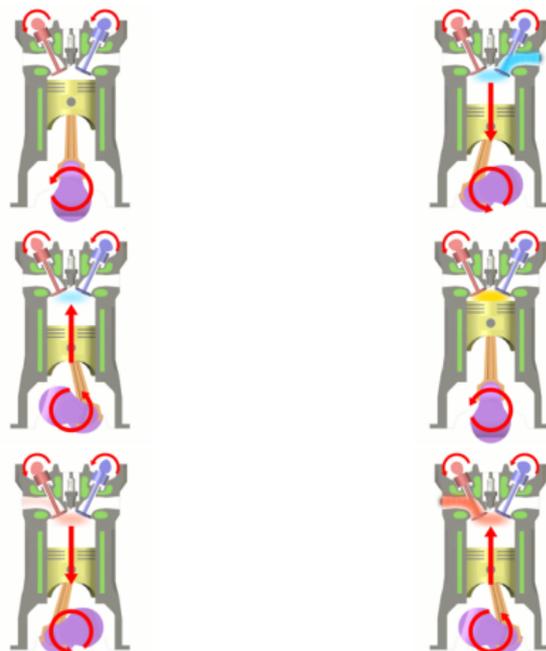
- ▶ $Q_c > 0$ est apporté par la combustion d'un mélange carburant et oxygène (descriptible aussi comme une variation d'énergie interne associée à la réaction chimique)
- ▶ le travail $-W_{\odot} > 0$ est fourni aux roues par un piston repoussé par la détente du mélange
- ▶ le transfert thermique $-Q_f > 0$ est cédé à l'air extérieur
- ▶  ce n'est pas une machine ditherme, on est en cycle ouvert

Réalisation : cycle de Beau de Rochas

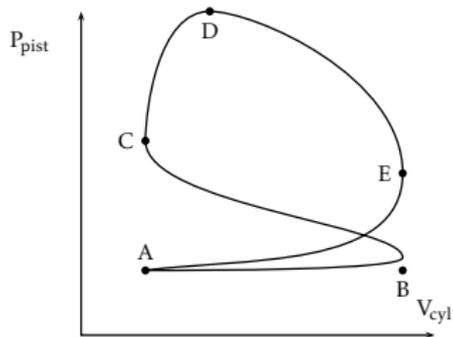
- ▶ on remplace les isothermes par des isochores pour aller plus vite
- ▶ moteur « à quatre temps », chaque temps correspondant à un mouvement du piston

Réalisation : cycle de Beau de Rochas

- Admission** R_a ouvert et R_e fermé :
entrée du mélange, $W_a \approx 0$
- Compression** R_a et R_e fermés :
retour du piston (entraîné par les autres pistons et l'inertie du vilebrequin), $W_c > 0$ puis **Explosion** isochore du mélange par l'étincelle de la bougie, $Q_c > 0$
- Détente** R_a et R_e fermés, $W_d < 0$
 $|W_d| > W_c$
- Échappement** R_a fermé et R_e ouvert, le cylindre est vidé du mélange $W_e \approx 0$ et $Q_f < 0$

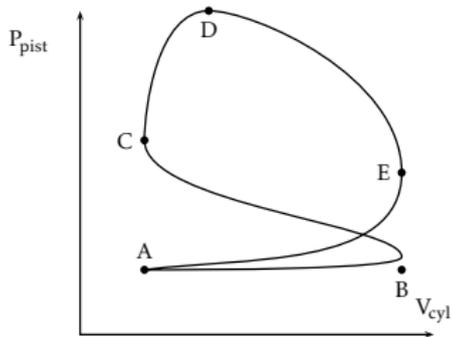


Modélisation et rendement

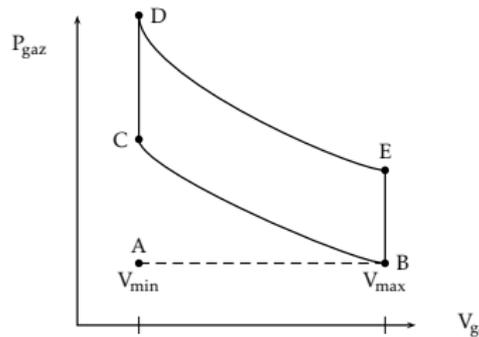


Allure du diagramme de Watt

Modélisation et rendement



Allure du diagramme de Watt



Modélisation du cycle en coordonnées de Clapeyron

Modélisation et rendement

Cycle idéal

Le cycle de Beau de Rochas est un cycle **réversible** constitué de deux isochores et deux adiabatiques. Il est caractérisé par le **taux de compression** $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ assurant un rendement $r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$ pour un gaz parfait.

Modélisation et rendement

Cycle idéal

Le cycle de Beau de Rochas est un cycle **réversible** constitué de deux isochores et deux adiabatiques. Il est caractérisé par le **taux de compression** $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ assurant un rendement $r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$ pour un gaz parfait.

Modélisation et rendement

Cycle idéal

Le cycle de Beau de Rochas est un cycle **réversible** constitué de deux isochores et deux adiabatiques. Il est caractérisé par le **taux de compression** $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ assurant un rendement $r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$ pour un gaz parfait.

- ▶ le cylindre est un système **ouvert** mais on raisonne sur le système **fermé** de $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$ en supposant qu'admission $A \rightarrow B$ et refoulement $B \rightarrow A$ se compensent exactement

Modélisation et rendement

Cycle idéal

Le cycle de Beau de Rochas est un cycle **réversible** constitué de deux isochores et deux adiabatiques. Il est caractérisé par le **taux de compression** $\alpha = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$ assurant un rendement $r = 1 - \frac{1}{\alpha^{\gamma-1}}$ pour un gaz parfait.

- ▶ le cylindre est un système **ouvert** mais on raisonne sur le système **fermé** de $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$ en supposant qu'admission $A \rightarrow B$ et refoulement $B \rightarrow A$ se compensent exactement
- ▶ typiquement : $\alpha = 6$, $\gamma = 1,4$ (GP diatomique) donne $r = 0,5$, on obtient plutôt 0,4.

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

4.1 Moteur à explosion

4.2 Moteur en écoulement permanent : la machine à vapeur

4.3 Cycles récepteurs en écoulement permanent

Machine à vapeur

Machine à vapeur

- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII^e)

Machine à vapeur

- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII^e)
- ▶ la vaporisation de H₂O en contact avec une source chaude augmente son volume et fournit un travail en repoussant un piston

Machine à vapeur

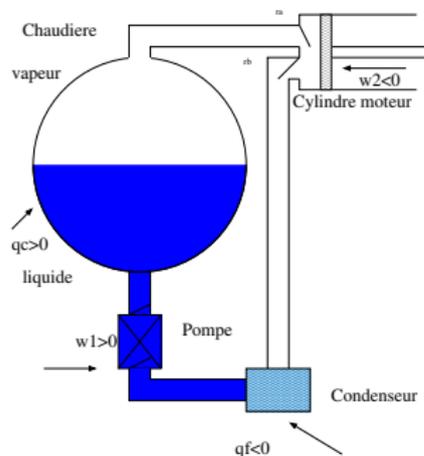
- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII^e)
- ▶ la vaporisation de H₂O en contact avec une source chaude augmente son volume et fournit un travail en repoussant un piston
- ▶ le refroidissement avec une source froide permet de revenir dans les conditions initiales pour décrire un cycle **moteur**

Machine à vapeur

- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII^e)
- ▶ la vaporisation de H₂O en contact avec une source chaude augmente son volume et fournit un travail en repoussant un piston
- ▶ le refroidissement avec une source froide permet de revenir dans les conditions initiales pour décrire un cycle **moteur**
- ▶ machine en **écoulement permanent**

Machine à vapeur

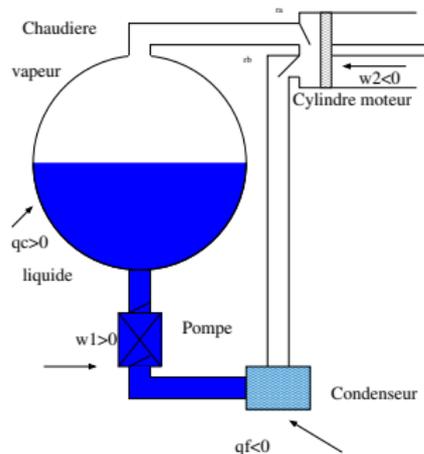
masse δm de fluide parcourant la machine :



Machine à vapeur

masse δm de fluide parcourant la machine :

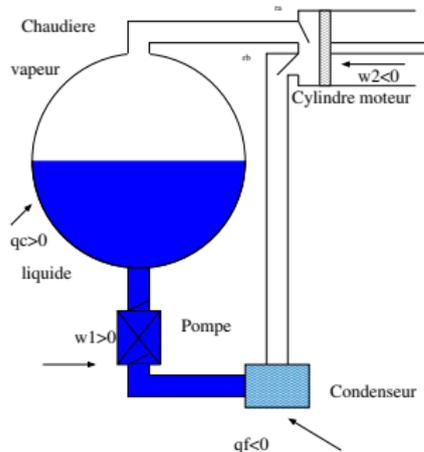
- ▶ r_a ouvert et r_r fermé : elle reçoit $q_c > 0$ dans la chaudière pour s'y vaporiser entièrement à $T_c, P_s(T_c)$ et se détendre dans le cylindre en fournissant du travail au piston



Machine à vapeur

masse δm de fluide parcourant la machine :

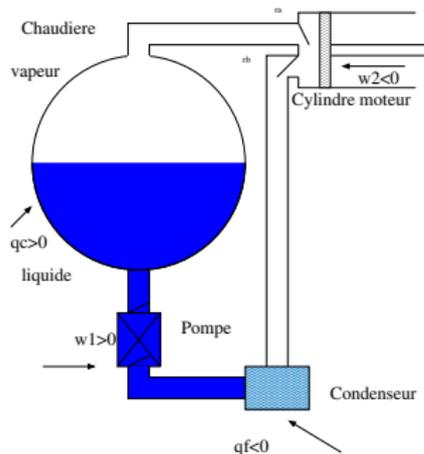
- ▶ r_a ouvert et r_r fermé : elle reçoit $q_c > 0$ dans la chaudière pour s'y vaporiser entièrement à $T_c, P_s(T_c)$ et se détendre dans le cylindre en fournissant du travail au piston
- ▶ r_a fermé et r_r ouverts : refoulement dans le condenseur où elle fournit $-q_f > 0$ à la source froide pour se liquéfier totalement



Machine à vapeur

masse δm de fluide parcourant la machine :

- ▶ r_a ouvert et r_r fermé : elle reçoit $q_c > 0$ dans la chaudière pour s'y vaporiser entièrement à $T_c, P_s(T_c)$ et se détendre dans le cylindre en fournissant du travail au piston
- ▶ r_a fermé et r_r ouverts : refoulement dans le condenseur où elle fournit $-q_f > 0$ à la source froide pour se liquéfier totalement
- ▶ elle est comprimée dans la pompe pour revenir à $P_e(T_c)$



Cycle de Rankine

Définition (Cycle de Rankine)

Un cycle de Rankine idéal est un cycle réversible composé de deux isobares et de deux adiabatiques. L'agent thermique est un corps pur diphasé (liquide/vapeur) dont la composition en liquide et vapeur évolue au cours du cycle.

- ▶ 1 → 2 vaporisation et admission à $T_c, P_s(T_c)$
- ▶ 2 → 3 détente adiabatique réversible et liquéfaction partielle jusqu'à $T_f, P_s(T_f)$
- ▶ 3 → 4 liquéfaction totale à $T_f, P_s(T_f)$
- ▶ 4 → 5 compression adiabatique réversible jusqu'à $P_s(T_c)$
- ▶ 5 → 1 chauffage jusqu'à T_c

Cycle de Rankine

Définition (Cycle de Rankine)

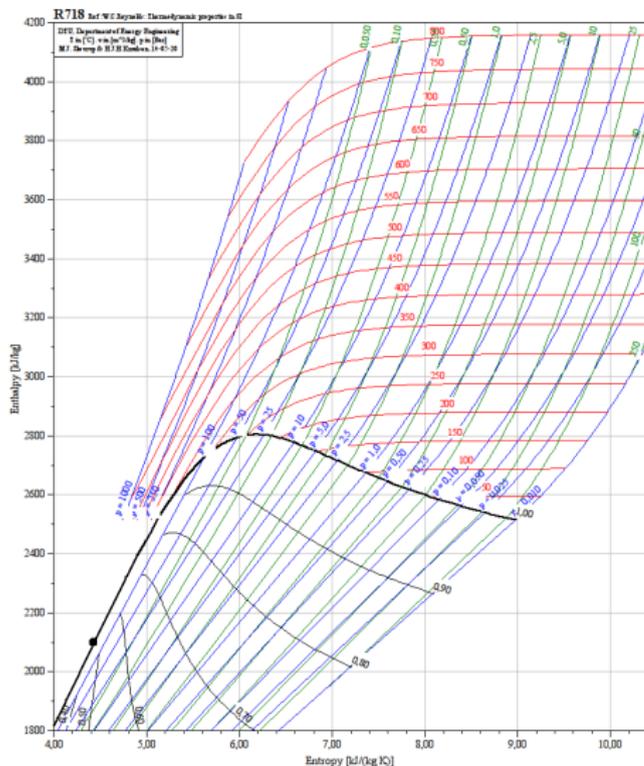
Un cycle de Rankine idéal est un cycle réversible composé de deux isobares et de deux adiabatiques. L'agent thermique est un corps pur diphasé (liquide/vapeur) dont la composition en liquide et vapeur évolue au cours du cycle.

- ▶ 1 → 2 vaporisation et admission à $T_c, P_s(T_c)$
- ▶ 2 → 3 détente adiabatique réversible et liquéfaction partielle jusqu'à $T_f, P_s(T_f)$
- ▶ 3 → 4 liquéfaction totale à $T_f, P_s(T_f)$
- ▶ 4 → 5 compression adiabatique réversible jusqu'à $P_s(T_c)$
- ▶ 5 → 1 chauffage jusqu'à T_c

le rendement s'exprime naturellement grâce à h :

$$r = \frac{-w}{q_{5 \rightarrow 2}} = \frac{q_{5 \rightarrow 2} + q_{3 \rightarrow 4}}{q_{5 \rightarrow 2}} = 1 - \frac{|q_{3 \rightarrow 4}|}{q_{5 \rightarrow 2}} = 1 - \frac{h_3 - h_4}{h_2 - h_5}$$

Diagramme enthalpique (de Mollier)



on lira les valeurs de h sur un diagramme de Mollier (cf. exercice) représentant h en fonction de s

1. Principe et modélisation

2. Conséquences du 2^e principe

3. Premier principe industriel en écoulement permanent

4. Modélisation de machines réelles

4.1 Moteur à explosion

4.2 Moteur en écoulement permanent : la machine à vapeur

4.3 Cycles récepteurs en écoulement permanent

Réfrigérateur et pompe à chaleur

Réfrigérateur et pompe à chaleur

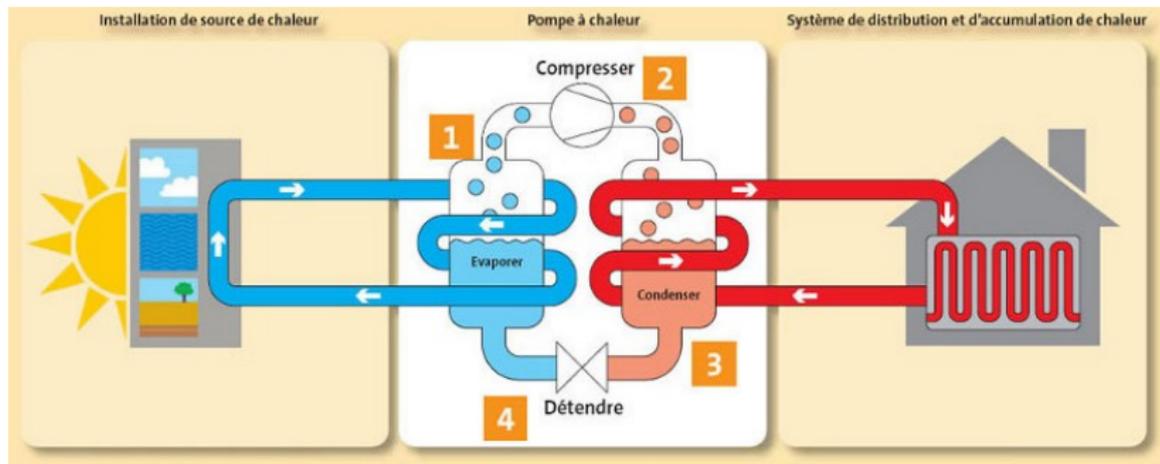
- ▶ pour des cycles récepteurs (PAC et réfrigérateur), on utilise le plus souvent des cycles à changement d'état

Réfrigérateur et pompe à chaleur

- ▶ pour des cycles récepteurs (PAC et réfrigérateur), on utilise le plus souvent des cycles à changement d'état
- ▶ le fluide prélève $Q_f > 0$ dans l'évaporateur, et cède $-Q_c > 0$ dans le condenseur

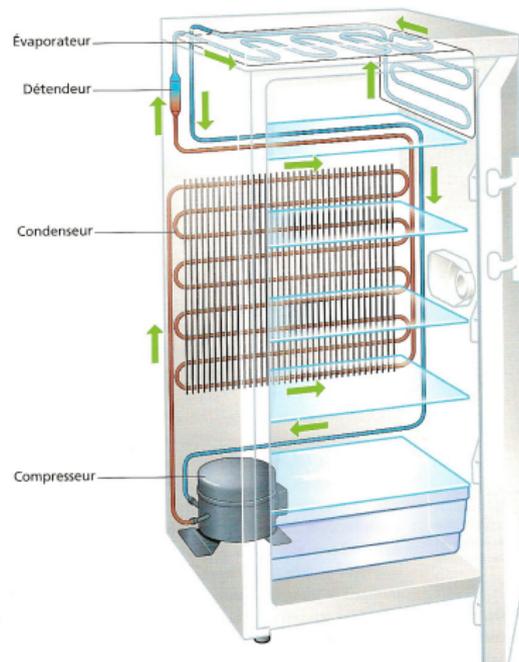
Réfrigérateur et pompe à chaleur

- ▶ pour des cycles récepteurs (PAC et réfrigérateur), on utilise le plus souvent des cycles à changement d'état
- ▶ le fluide prélève $Q_f > 0$ dans l'évaporateur, et cède $-Q_c > 0$ dans le condenseur



Pompe à chaleur

Réfrigérateur et pompe à chaleur



Réfrigérateur

- ▶ Les égalités des cycles
- ▶ l'inégalité de Clausius
- ▶ le premier principe industriel
- ▶ le calcul du rendement/efficacité des machines dithermes
- ▶ l'expression du rendement de Carnot