

# 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<sup>e</sup> principe) va limiter l'efficacité de cette conversion
- ▶ l'étude des machines thermiques (production de travail à partir de chaleur) au XIX<sup>e</sup> (Sadi Carnot) a fondé la thermodynamique, en fournissant le premier énoncé du 2<sup>e</sup> principe

## 1. Principe et modélisation

## 2. Conséquences du 2<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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  $\text{CCl}_3\text{F}$  ou d'autres alcanes halogénés, isobutane  $\text{C}_4\text{H}_{10}$
- ▶ 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 :

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

☠  $\Delta S_{\odot} = 0$  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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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  $W_{\odot} > 0$  qu'il cède intégralement sous forme de transfert thermique  $Q_{\odot} < 0$  à la pièce dont il maintient la

## 1. Principe et modélisation

## 2. Conséquences du 2<sup>e</sup> 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  $Q_c = -\frac{T_c}{T_f} Q_f$  ( $|pente| > 1$ ) : demis-plans possible / impossible (2<sup>e</sup> 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 :

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

## 1. Principe et modélisation

## 2. Conséquences du 2<sup>e</sup> 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  $T_c \simeq 600\text{ K}$ , soit  $r_c \simeq 53\%$
- ▶ 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  $\gamma$ , 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  $-W_{\text{cycle}}$  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  $\text{CH}_4$ ). 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> principe
3. Premier principe industriel en écoulement permanent
4. Modélisation de machines réelles

## 1. Principe et modélisation

## 2. Conséquences du 2<sup>e</sup> principe

## 3. Premier principe industriel en écoulement permanent

### 3.1 Système ouvert en écoulement permanent

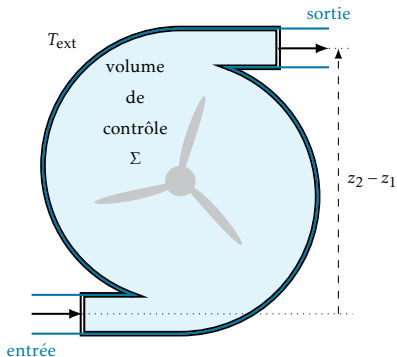
### 3.2 Nouvelle formulation du premier principe

## 4. Modélisation de machines réelles



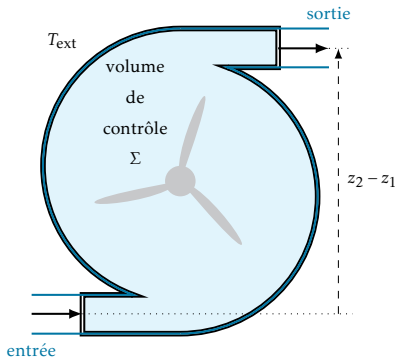
# Présentation

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



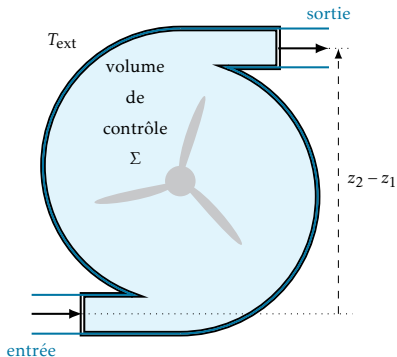
# Présentation

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

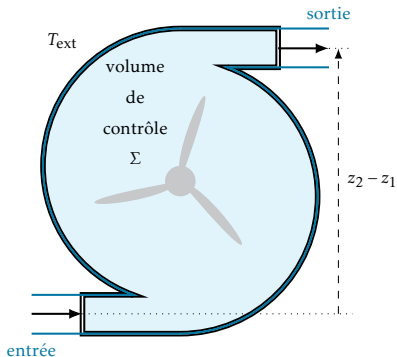


# Présentation

- ▶ on a toujours travaillé sur des systèmes **fermés**
- ▶ dans toute machine, chaque organe (compresseur, piston, détendeur) 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, détendeur) 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 a**

# Volume de contrôle

## Définition (Volume de contrôle)

Un **volume de contrôle**, noté  $\Sigma$ , 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  $\Sigma$
- ▶ indices 1 pour ce qui rentre, 2 pour ce qui sort,  $\Sigma$  pour ce qui à l'intérieur

# Débit de masse

## Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit  $\delta m$  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  $\delta m$  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  $\delta m$  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  $\delta m$  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  $\delta m$  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  $\delta m$  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  $\rho$  :  $\rightarrow D = \rho c S$

# Débit de masse

## Définition (Débit de masse)

Soit une section d'un fluide en écoulement, et soit  $\delta m$  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  $\rho$  :  $\rightarrow D = \rho c S$
  - ▶ 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  $\delta m$  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  $\rho$  :  $\rightarrow D = \rho c S$
  - ▶ 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  $\delta m$  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  $\rho$  :  $\rightarrow D = \rho c S$
  - ▶ 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<sup>e</sup> 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,  $\Delta g z$  négligeable,  $\Delta c^2/2$  négligeable sauf pour un turboréacteur

# Expression

- ▶ le plus souvent,  $\Delta gz$  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,  $\Delta gz$  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<sup>e</sup> principe

## 3. Premier principe industriel en écoulement permanent

## 4. Modélisation de machines réelles



## 1. Principe et modélisation

## 2. Conséquences du 2<sup>e</sup> 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

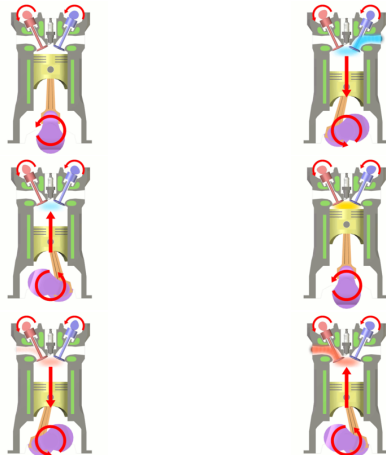
- ▶  $Q_c > 0$  est apporté par la combustion d'un mélange carburant et oxygène (descriptible aussi comme une variation d'énergie interne associée à la réaction chimique)
- ▶ le travail  $-W_{\odot} > 0$  est fourni aux roues par un piston repoussé par la détente du mélange
- ▶ le transfert thermique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

# Réalisation : cycle de Beau de Rochas

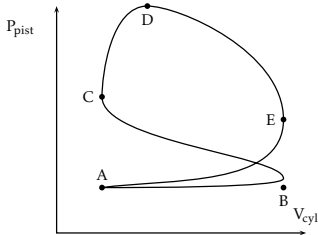
- ▶ on remplace les isothermes par des isochores pour aller plus vite
- ▶ moteur « à quatre temps », chaque temps correspondant à un mouvement du piston

# Réalisation : cycle de Beau de Rochas

- 1 **Admission**  $R_a$  ouvert et  $R_e$  fermé :  
 entrée du mélange,  $W_a \approx 0$
- 2 **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,  $Q_c > 0$
- 3 **Détente**  $R_a$  et  $R_e$  fermés,  $W_d < 0$   
 $|W_d| > W_c$
- 4 **Échappement**  $R_a$  fermé et  $R_e$   
 ouvert, le cylindre est vidé du  
 mélange  $W_e \approx 0$  et  $Q_f < 0$



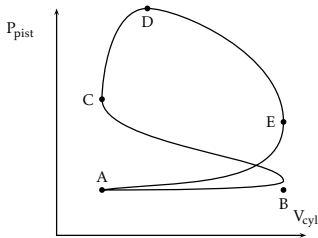
# Modélisation et rendement



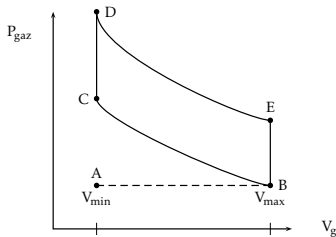
Allure du diagramme de Watt



# 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup>)



# Machine à vapeur

- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII<sup>e</sup>)
- ▶ la vaporisation de  $H_2O$  en contact avec une source chaude augmente son volume et fournit un travail en repoussant un piston

# Machine à vapeur

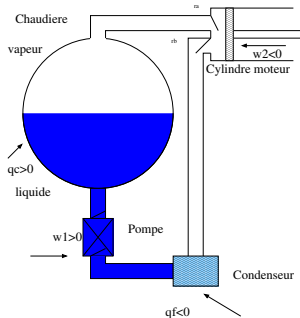
- ▶ principe général (1690) par Papin, premier prototype par Watt, premier bateau à vapeur par Fulton (fin XVIII<sup>e</sup>)
- ▶ la vaporisation de  $H_2O$  en contact avec une source chaude augmente son volume et fournit un travail en repoussant un piston
- ▶ le refroidissement avec une source froide 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<sup>e</sup>)
- ▶ la vaporisation de  $H_2O$  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

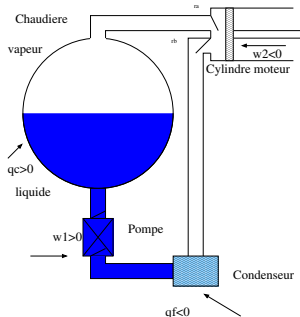
masse  $\delta m$  de fluide parcourant la machine :



# Machine à vapeur

masse  $\delta m$  de fluide parcourant la machine :

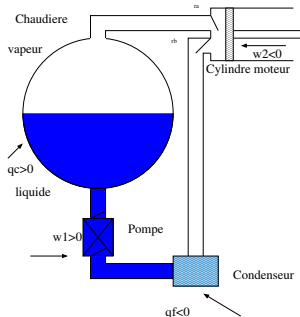
- $r_a$  ouvert et  $r_r$  fermé : elle reçoit  $q_c > 0$  dans la chaudière pour s'y vaporiser entièrement à  $T_c, P_s(T_c)$  et se détendre dans le cylindre en fournissant du travail au piston



# Machine à vapeur

masse  $\delta m$  de fluide parcourant la machine :

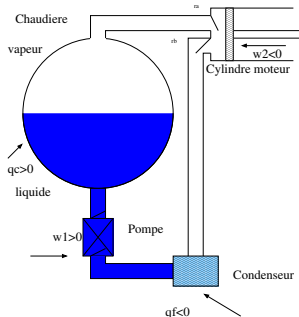
- ▶  $r_a$  ouvert et  $r_r$  fermé : elle reçoit  $q_c > 0$  dans la chaudière pour s'y vaporiser entièrement à  $T_c, P_s(T_c)$  et se détendre dans le cylindre en fournissant du travail au piston
- ▶  $r_a$  fermé et  $r_r$  ouverts : refoulement dans le condenseur où elle fournit  $-q_f > 0$  à la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



# Machine à vapeur

masse  $\delta m$  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)

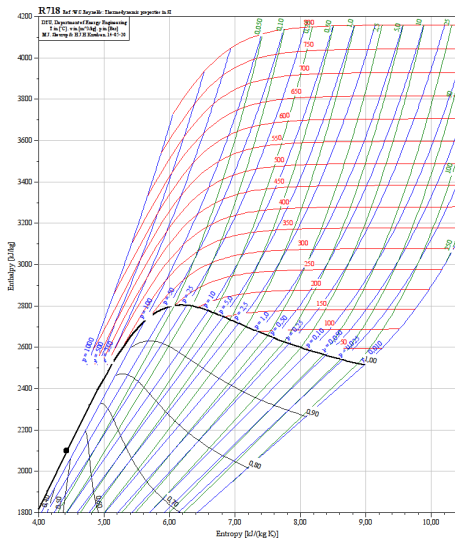
Un cycle de Rankine idéal est un cycle réversible composé de deux isobares et de deux adiabatiques. L'agent thermique est un corps pur diphasé (liquide/vapeur) dont la composition en liquide et vapeur évolue au cours du cycle.

- ▶ 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<sup>e</sup> 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

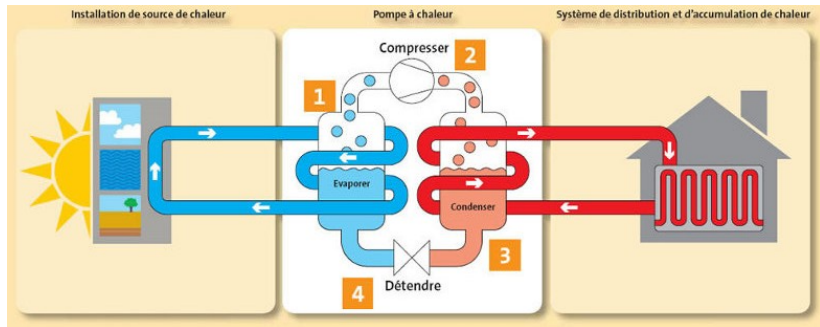
- ▶ pour des cycles récepteurs (PAC et réfrigérateur), on utilise le plus souvent des cycles à changement d'état

# 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

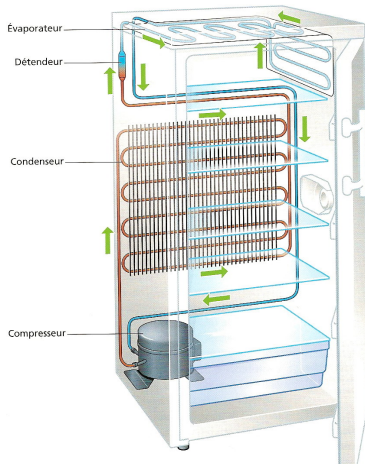
# Réfrigérateur et pompe à chaleur

- ▶ 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