

Cours 07 – Moteurs thermiques et réfrigérateurs: l'idéal

Survol:

- moteur thermique idéal
 - o rendement
 - o cycle de Carnot
- réfrigérateur idéal
 - o efficacité

Moteurs thermiques

Nous avons vu qu'il est possible d'augmenter l'énergie d'un système A en le mettant en contact thermique avec un système A' sur lequel il est possible d'effectuer un travail

- exemple: on chauffe de l'eau dans une bouilloire

$$\text{électrique: } \Delta E = Q = -Q_{\text{resis}} = W_{\text{resis}} - \Delta E_{\text{resis}}$$

Le principe d'un moteur thermique consiste à arriver à faire l'inverse: tirer un travail d'un réservoir thermique. L'autre caractéristique d'un moteur thermique, c'est qu'il doit pouvoir le faire plus d'une fois, et donc revenir à son état initial: il doit effectuer un cycle.

Exemple:

Évidemment, s'il est possible de transformer complètement un travail en chaleur, la proportion de la chaleur qui pourra être retransformée en travail n'est pas complète.

Exemple:

- Vous agitez l'eau d'un bol avec un batteur à œufs.
- Vous produisez ainsi un travail qui sera réparti sur tous les degrés de liberté des molécules d'eau, faisant augmenter l'entropie de l'eau et sa température.

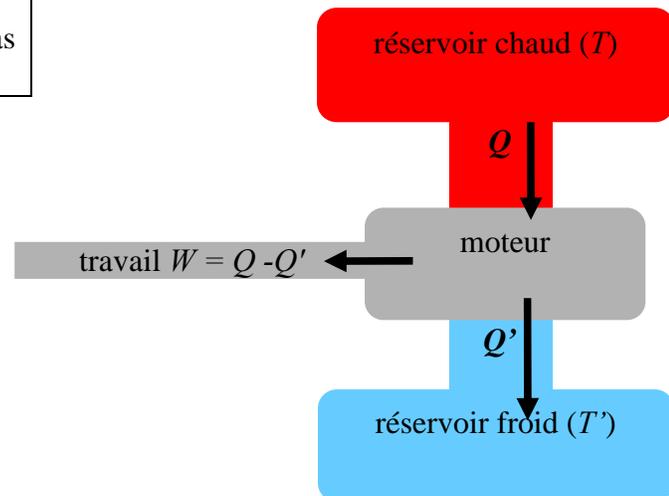
- Il est hautement improbable que les molécules d'eau se mettent toutes à frapper les batteurs suivant les bonnes orientations de façon à faire tourner le batteur et lui faire régénérer l'électricité dépensée.

De la chaleur est de l'énergie (purement cinétique pour un gaz parfait) répartie aléatoirement sur tous les degrés de liberté d'un système. Même si un système possède beaucoup de chaleur (e.g. vous êtes quelque part dans le Soleil), il n'est pas possible d'en tirer un travail sans un réservoir froid.

Principe général d'un moteur thermique:

- $Q < 0$ car le réservoir chaud perd de la chaleur
- $Q' > 0$ car le réservoir froid absorbe de la chaleur
- Par définition, la température des réservoirs change de façon négligeable avec Q et Q'

Rendement:



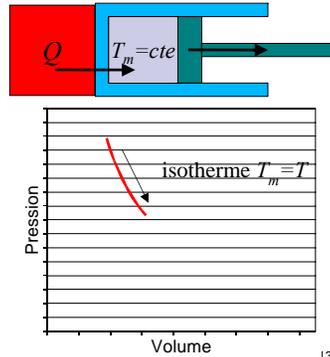
cycle de Carnot (Sadi de son prénom, 1824)

Pour obtenir le rendement théorique maximal, on doit effectuer le transfert de chaleur avec les réservoirs sans créer d'entropie durant le cycle. Supposons que le moteur est constitué d'un cylindre à piston contenant un gaz. Pour transférer la chaleur du réservoir chaud au gaz sans créer d'entropie, ils doivent être à des températures très proches (mais pas exactement la même pour qu'il y ait transfert).

cycle de Carnot

□ détente isotherme

- pour maintenir la température du gaz constante à mesure que Q est transféré du réservoir chaud au gaz, le volume du gaz doit être augmenté

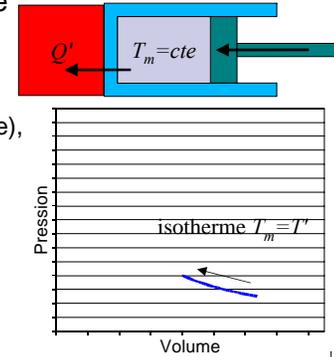


13

cycle de Carnot

□ compression isotherme

- lorsqu'on mettra le gaz en contact avec le réservoir froid, pour les mêmes raisons (entropie), on maintiendra la température du gaz constante à T' à mesure que Q' est transféré du gaz au réservoir froid

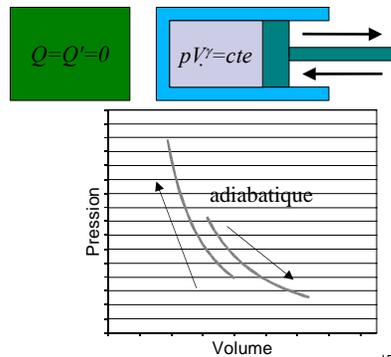


14

cycle de Carnot

□ compression/détente adiabatique

- entre les deux, on changera le volume de façon adiabatique de manière à changer la température du gaz sans changer son entropie



15

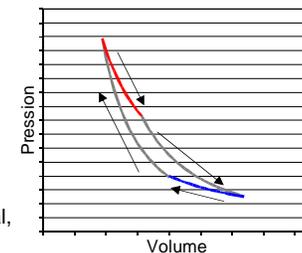
cycle de Carnot

□ cycle complet

- À la fin du cycle, le travail effectué par la gaz sera donné par l'air à l'intérieur des courbes isothermes / adiabatiques

- ceci constitue un cycle idéal, i.e. un cycle pour lequel

$$e = 1 - \frac{Q'}{Q} = 1 - \frac{\Delta S' T'}{\Delta S T} = 1 - \frac{T'}{T} \text{ car } \Delta S_{\text{tot}} = 0 \text{ sur ce cycle}$$



16

Problèmes du cycle de Carnot:

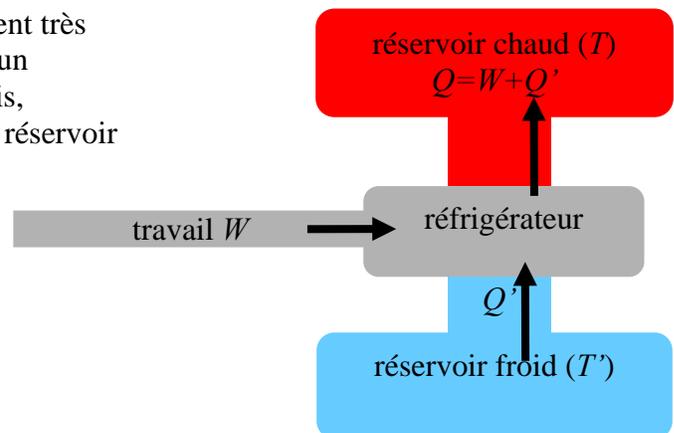
- La température du moteur doit être infinitésimalement plus petite que celle du réservoir chaud, et infinitésimalement plus grande que celle du réservoir froid.
- Le flux de chaleur pendant la détente ou la compression isotherme est donc, lui aussi, infinitésimal.
- Un moteur de Carnot permet donc un rendement optimal, mais délivre un travail par unité de temps (i.e. puissance) infinitésimale.
- Tout moteur thermique réel offre donc un rendement moindre que le moteur de Carnot.

Note historique: Lors de l'écriture de son mémoire en 1824, Carnot avait identifié que dans le cycle idéal, "quelque chose" devait être transporté du réservoir chaud au réservoir froid en quantité égale. Ce "quelque chose" était confondu avec la chaleur. Cependant, la température était mal définie et on ignorait que le 0 absolu existait; Q/T était donc mal défini. Ce n'est qu'en 1865 que Clausius montra toute l'implication de ce "quelque chose", et l'appela "entropie", du grec "transformation", sans identifier ce qu'était (ou d'où provenait) l'entropie. Boltzmann donna une explication « microscopiste » de ce qu'était cette quantité vers 1877.

Réfrigérateurs

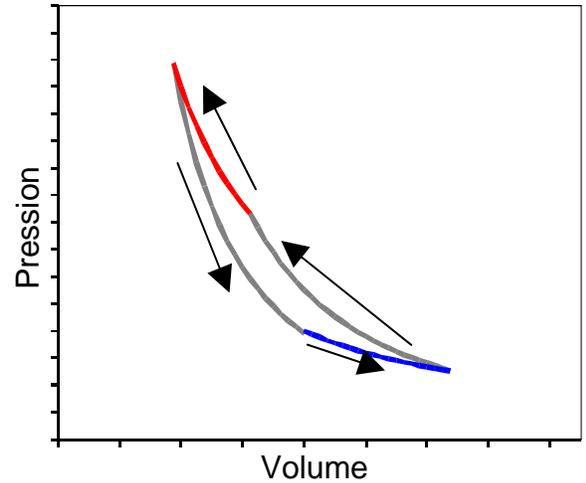
Bien que le mode de fonctionnement soit généralement très différent, au niveau du principe, un réfrigérateur est un moteur thermique qui fonctionne à l'envers. Cette fois, moyennant un travail W , on extraira la chaleur Q' du réservoir froid pour la transférer dans le réservoir chaud

principe général:



- Cycle idéal: même cycle (Carnot) mais inversé.
- $Q > 0$ car le réservoir chaud absorbe de la chaleur.
- $Q' < 0$ car on prend de la chaleur au réservoir froid.

Efficacité



- Exemples:
 - o Un congélateur idéal à 255 K (-18°C) dans une pièce à 298 K (25°C) aura une efficacité théorique $e' \leq 5.9$ (590%)
 - autrement dit, pour chaque Joule investi en travail, on extraira 5.9 J du congélateur et on enverra au maximum 6.9 J dans la pièce
 - o Pour un liquéfacteur idéal d'hélium (4K) dans une pièce (298 K), $e' \leq 1.4\%$
- Remarques:
 - o si $T' = T$, $e' \rightarrow \infty$
 - o si $T' > T$, $e' < 0$
 - o i.e. pas besoin fournir de travail pour extraire de la chaleur du système froid qui, en passant, n'est plus le système froid si $T' > T$!
 - o exemple:
 - vous mettez votre frigo dehors à -30°C
 - par ailleurs pour un frigo, T augmente l'été en général, donc e' diminue
- Thermopompes:
 - o on réfrigère l'extérieur pour réchauffer l'intérieur de la maison
 - o donc pour chaque J investi dans la machine $e'+1$ J chauffent la maison
 - o à $T = 25^\circ\text{C}$ et $T' = 0^\circ\text{C}$, $e' \leq 11$;
 - o mais à $T' = -30^\circ\text{C}$, $e' \leq 4$ (... et en réalité ~ 1)

À retenir

- Pour un moteur: $e \leq 1 - \frac{T'}{T}$
- Pour un réfrigérateur: $e' \leq \frac{1}{T/T' - 1} = \frac{T'}{T - T'}$
- Pour avoir égalité (i.e. rendement/efficacité théorique maximum), il faut que l'entropie soit transférée entièrement, et sans en ajouter, du réservoir chaud au réservoir froid (ou inversement): cycle de Carnot.
- Ceci implique qu'il faut que le moteur / réfrigérateur soient successivement à la même température que les réservoirs chaud et froid durant tout le transfert thermique, ce qui implique un flux de chaleur infinitésimal.