

MEC1210_Thermodynamique

(Heures 18-21)

Second principe de la thermodynamique



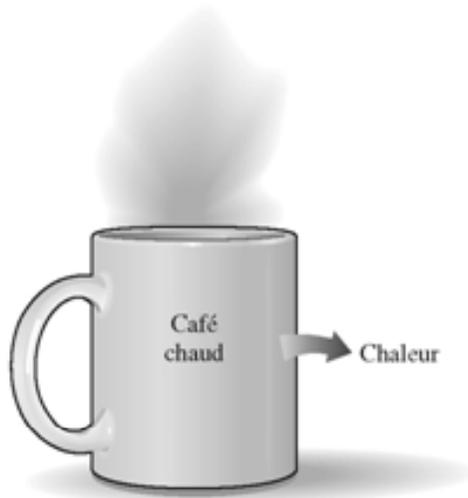
Smail Guenoun

(D'après les notes de cours de Pr.Huu Duc Vo)

Objectifs

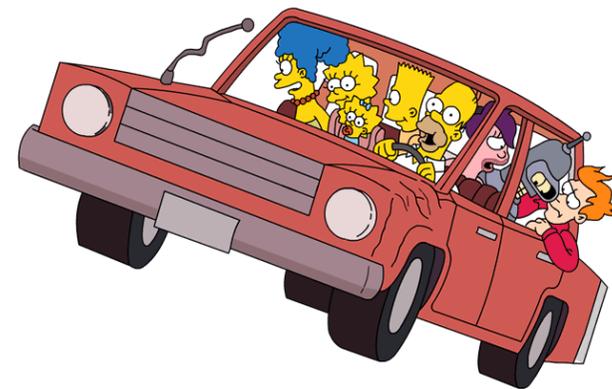
- ❖ **Présenter les insuffisances du principe de la thermodynamique**
- ❖ **Discuter de l'utilité du second principe de la thermodynamique**
- ❖ **Présenter et appliquer la deuxième loi de la thermodynamique**
- ❖ **Définir le cycle et le rendement de Carnot**
- ❖ **Définir des expressions qui prédisent le rendement et la performance thermique des machines**

Introduction

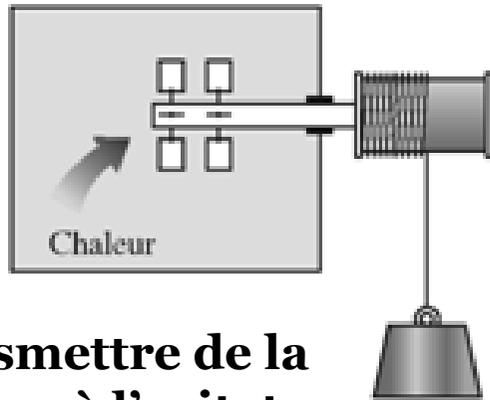


Une tasse de café ne se réchauffe pas dans un environnement plus froid

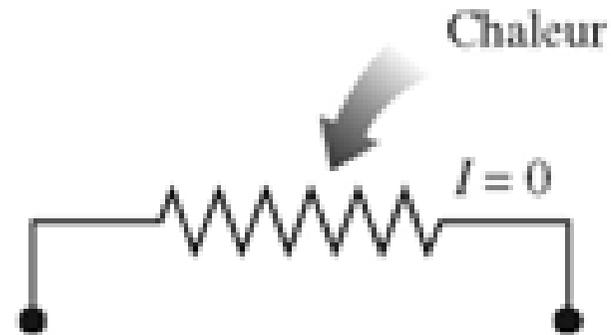
Une voiture consomme de l'essence lorsqu'on lui fait monter une pente mais, lors de la descente, l'essence ne va pas revenir à son niveau initial dans le réservoir.



Introduction



Transmettre de la chaleur à l'agitateur ne le fait pas tourner



Un courant électrique n'est pas restitué si on lui transmet de la chaleur

- ✓ La première loi n'impose aucune restriction sur le sens dans lequel la chaleur est transmise ou le travail est effectué.
- ✓ Une évolution doit respecter simultanément la première **ET** la deuxième loi de la thermodynamique

Second principe de la thermodynamique

Utilité :

- ✓ Indiquer le sens des évolutions
- ✓ Prédire les performances optimales d'un système thermodynamique
- ✓ Définir une échelle des températures indépendante des propriétés des substances
- ✓ Déterminer quantitativement les irréversibilités qui réduisent le rendement.

Définitions

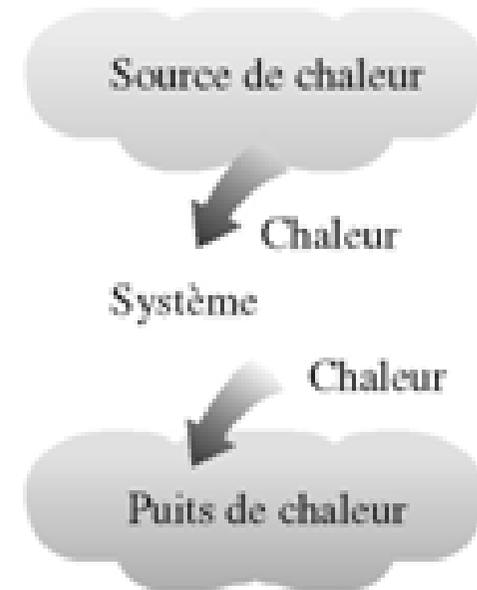
Réservoir thermique : Un corps hypothétique qui peut absorber ou perdre une quantité définie de chaleur sans changer de température

Exemples :

- océans, lacs, atmosphère (large capacité de stockage d'énergie)
- un système à deux phases (T constante durant un changement de phase)

Une source de chaleur est un réservoir thermique qui fournit de la chaleur à un système.

Un puit de chaleur est un réservoir thermique qui absorbe de la chaleur dégagée par un système.

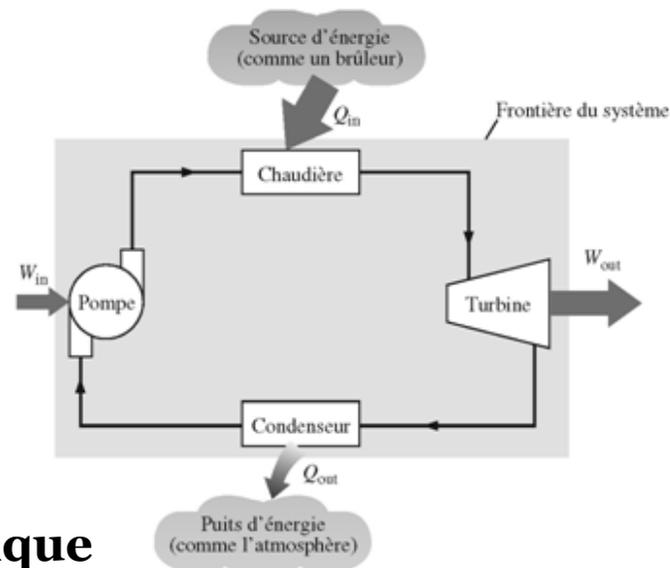


Définitions

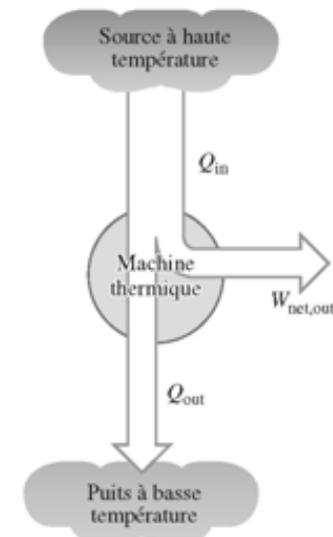
Machines thermiques

- ✓ Elles reçoivent de la chaleur d'une source à haute température (chaudière, etc...)
- ✓ Elles convertissent une partie de la chaleur en travail
- ✓ Elles rejettent le reste de la chaleur dans un puits à basse température (l'atmosphère, lac, etc...)
- ✓ Elles décrivent un cycle.

- ✓ La chaleur est transmise au sein des machines thermiques par un fluide **caloporteur**.



Centrale thermique



Définitions

Rendement thermique: mesure l'aptitude d'une machine à convertir la chaleur en travail. Il est toujours **inférieur à 1**.

$$\text{Rendement thermique} = \frac{\text{Travail net produit}}{\text{Chaleur ajoutée}} \Rightarrow \eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Réfrigérateur et pompe thermique :

Un système qui *requiert* du travail pour transférer de la chaleur d'un réservoir à basse température à un réservoir à haute température .

Coefficient de performance: $COP = \frac{\text{Chaleur extraite}}{\text{Travail requis}}$

Réfrigérateur:

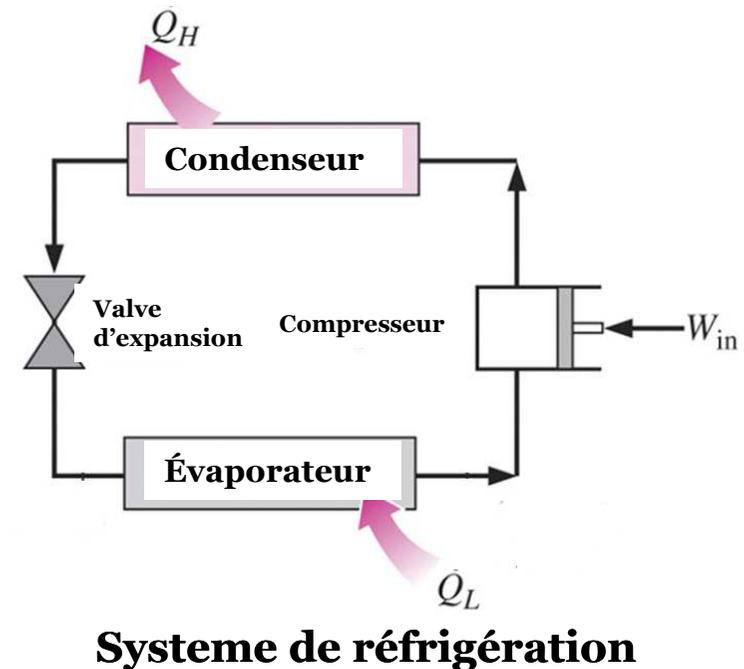
$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

Pompe thermique:

$$COP_{TP} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

Note:

$$COP_{TP} - COP_R = 1 \text{ ou } COP_{TP} = COP_R + 1$$



Définitions

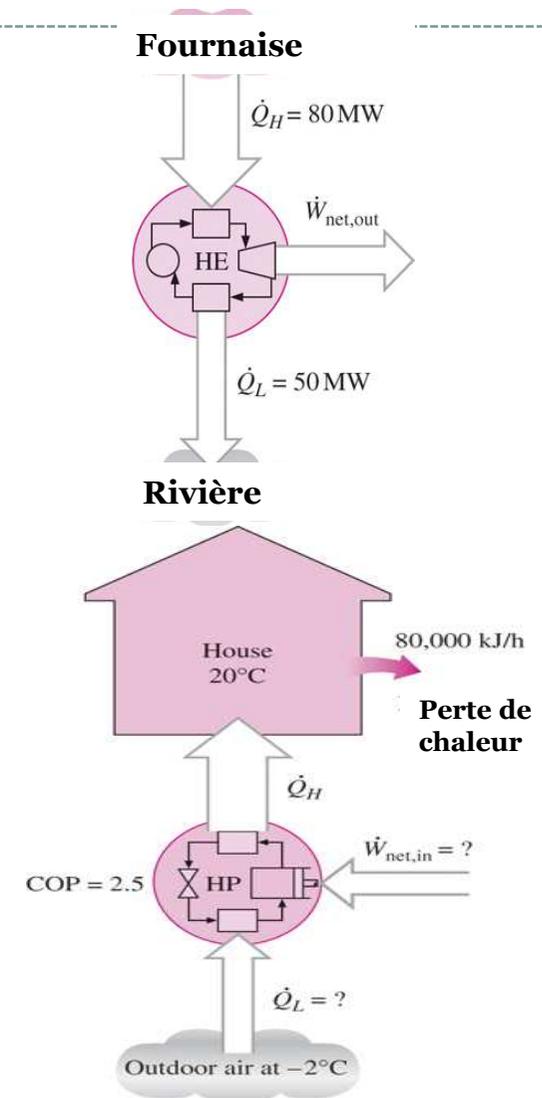
Exemple 1: exemple 6.1 du livre

Une fournaise transmet une puissance thermique de 80MW à une machine thermique. La machine thermique rejette 50MW dans la rivière à proximité. Déterminez la puissance nette produite par la machine thermique ainsi que son rendement thermique.

Exemple 2: exemple 6.4 du livre

Une thermopompe est employée pour chauffer une maison et maintenir la température intérieure à 20°C. lorsque la température extérieure est de -2 °C, on estime que la puissance thermique perdue par la maison est de 80 000 kJ/h et le coefficient de performance de la thermopompe de 2.5. Déterminez:

- 1) La puissance consommée par la thermopompe
- 2) La puissance thermique extraite de l'air extérieur



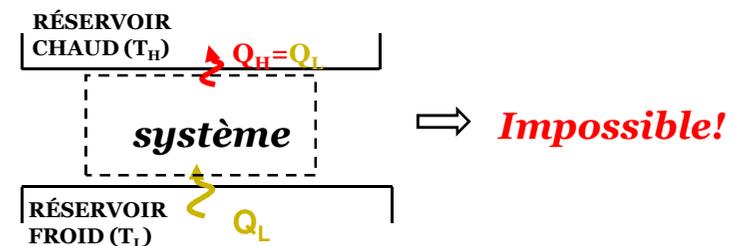
Second principe de la thermodynamique

Énoncés du deuxième principe de la thermodynamique

On peut présenter le second principe de la thermodynamique par deux énoncés (parmi d'autres) qui sont équivalents

a) Énoncé de Clausius

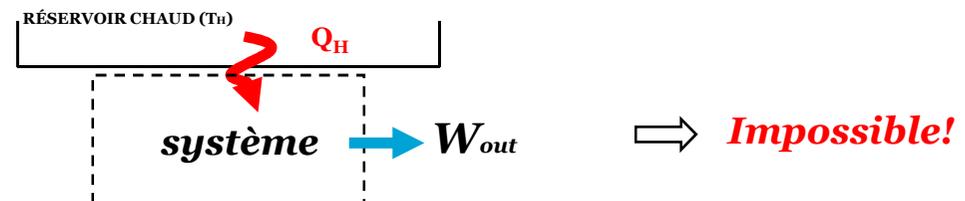
Aucun système ne peut uniquement (c'est-à-dire sans apport de l'environnement) transmettre de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud



Physiquement: la chaleur peut *automatiquement* être transmise d'un corps chaud à un corps froid, mais **pas l'inverse!**

b) Énoncé de Kelvin-Planck

Aucun système ne peut accomplir un cycle et effectuer un travail net sur l'environnement en recevant de la chaleur d'un seul réservoir

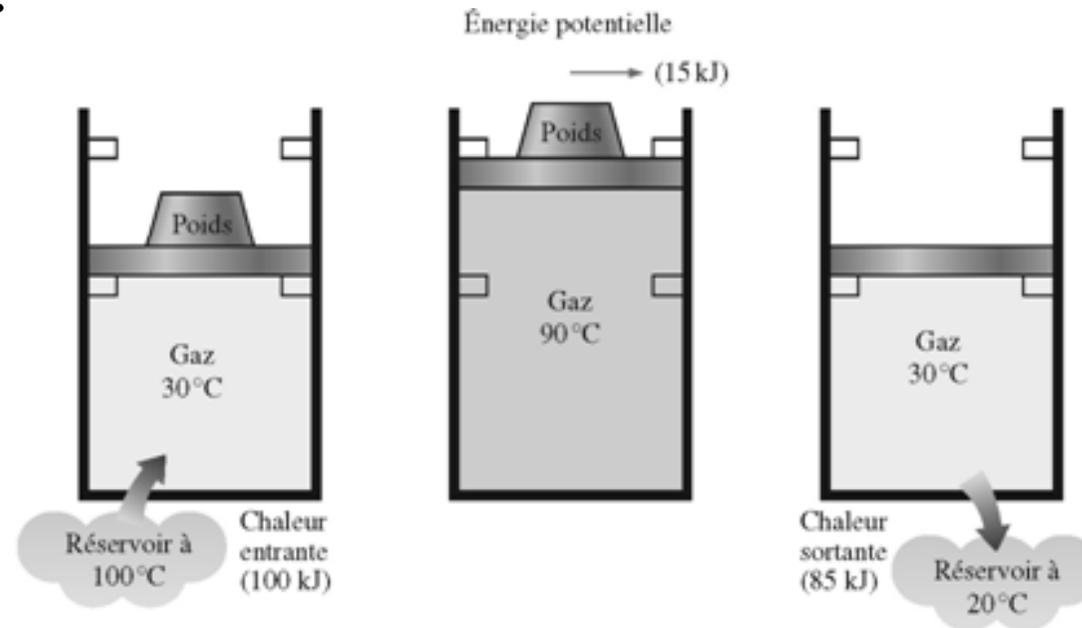


Second principe de la thermodynamique

b) Énoncé de Kelvin-Planck (cont.)

Physiquement: on ne peut convertir 100% de la chaleur en travail ($\eta_{th} < 1.0$).

Exemple:



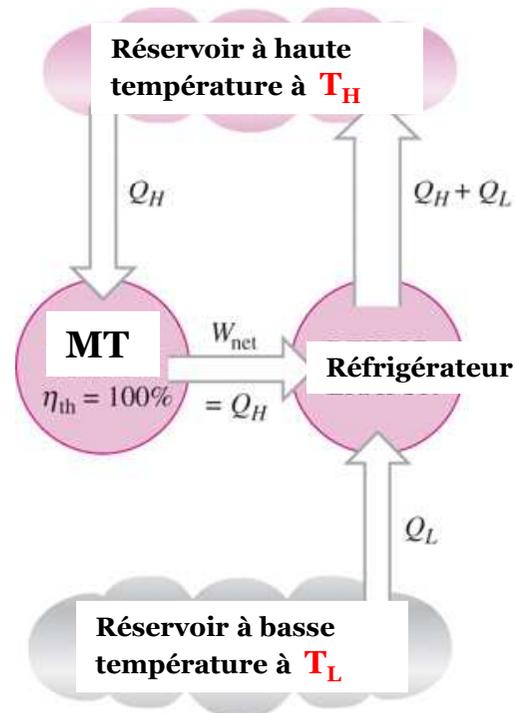
Donc, seulement une partie de Q_H peut être convertie en travail ($W=Q_H-Q_L$), sacrifiant Q_L

Pour revenir à l'état 1 et compléter le cycle, on doit transférer la chaleur résiduelle à un réservoir de basse température

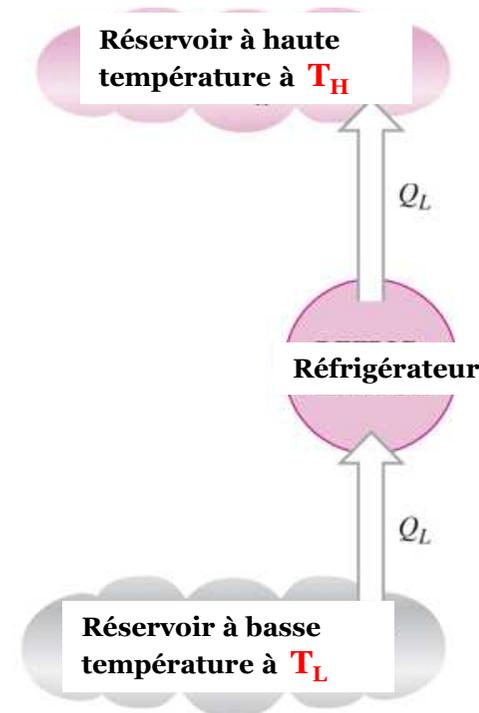
Second principe de la thermodynamique

Équivalence des deux énoncés:

- Les énoncés de Kelvin-Planck et Clausius s'appuient sur l'observation expérimentale
- Deux énoncés sont équivalentes s'ils sont vrais simultanément ou s'ils sont faux simultanément. Examinons **l'exemple ci-dessous**.



Réfrigérateur alimenté par une machine thermique dont le rendement est de 100%

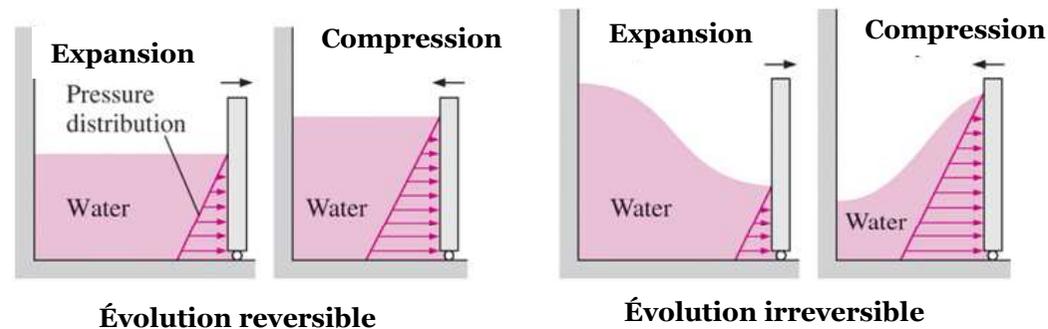


Réfrigérateur équivalent

Second principe de la thermodynamique

Évolution réversible

Une **évolution réversible** est une évolution qui peut être **inversée** sans laisser de trace sur l'environnement (c'est-à-dire que le système ET l'environnement retournent tous deux exactement à leurs états initiaux).



Note:

- 1) Une évolution réversible est une *conception idéale*, approchable, mais inatteignable dans la réalité
- 2) Les systèmes avec des évolutions réversibles donnent le plus de travail et consomment le moins d'énergie
- 3) Les évolutions réversibles donnent donc la limite théorique de performance à laquelle on peut comparer les procédés réels

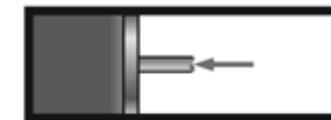
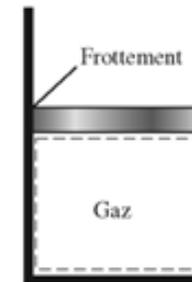
Second principe de la thermodynamique

Évolution irréversible

Une **évolution irréversible** est une évolution qui laisserait des traces sur l'environnement si le système est ramené à son état initial

Quelques facteurs d'irréversibilité:

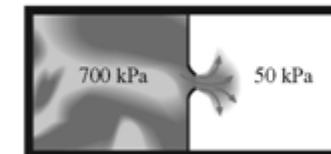
- friction
- mélange de deux ou plusieurs fluides
- résistance électrique
- déformation inélastique
- réaction chimique
- évolution ou expansion rapide (non quasi-statique)
- Détente libre d'un gaz
- transfert de chaleur à travers une différence de température



a) Compression rapide.



b) Détente rapide.



c) Détente libre.

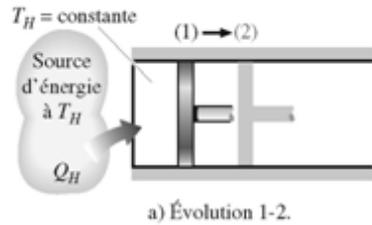
Second principe de la thermodynamique

Notes:

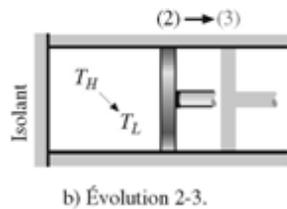
- une évolution est intérieurement réversible si le système ne contient *aucun* facteur d'irréversibilité à l'intérieur de ses frontières
- une évolution est extérieurement réversible s'il n'y a *aucun* facteur d'irréversibilité à l'extérieur des frontières du système
- une évolution est (totale)ment réversible s'il n'y a *aucun* facteur d'irréversibilité dans le système ni dans l'environnement

Cycle de Carnot

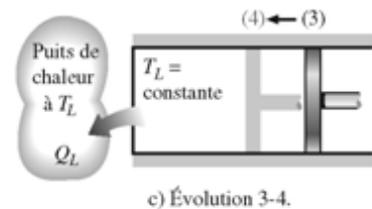
Cycle de production d'énergie composé de quatre évolutions *réversibles* pour décrire un moteur thermique optimal.



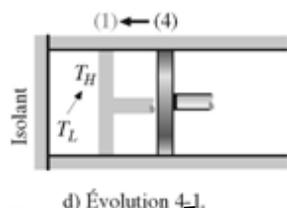
Expansion isothermique quasi-statique.
Transfert de chaleur réversible au système.
Travail fait sur l'environnement



Expansion adiabatique quasi-statique.
Travail fait sur l'environnement.

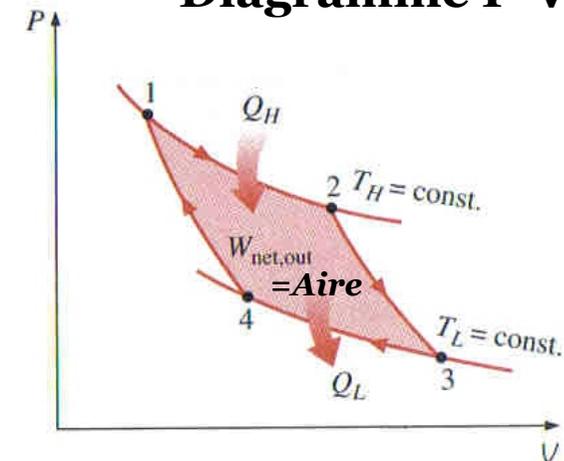


Compression isothermique quasi-statique.
Transfert de chaleur réversible à l'environnement.
Travail fait sur système.



Compression adiabatique quasi-statique.
Travail fait sur système.

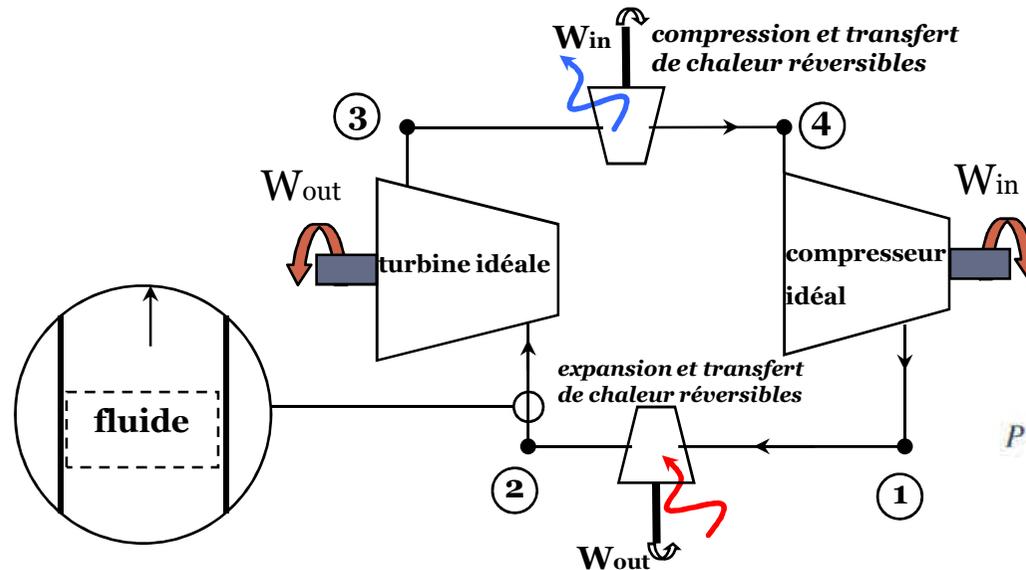
Diagramme P-V



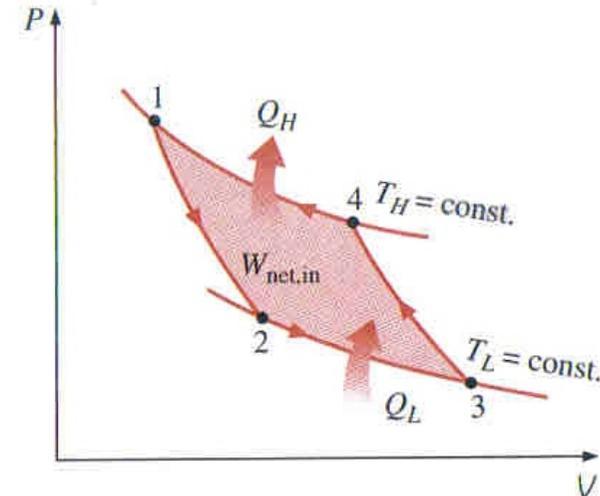
Définitions

Notes:

- Le cycle Carnot s'applique autant à un système ouvert qu'à un système fermé



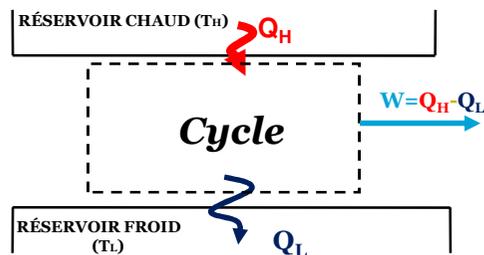
- Le cycle Carnot inversé = cycle de réfrigération optimale



Corollaires du second principe

5) Corollaires du second principe

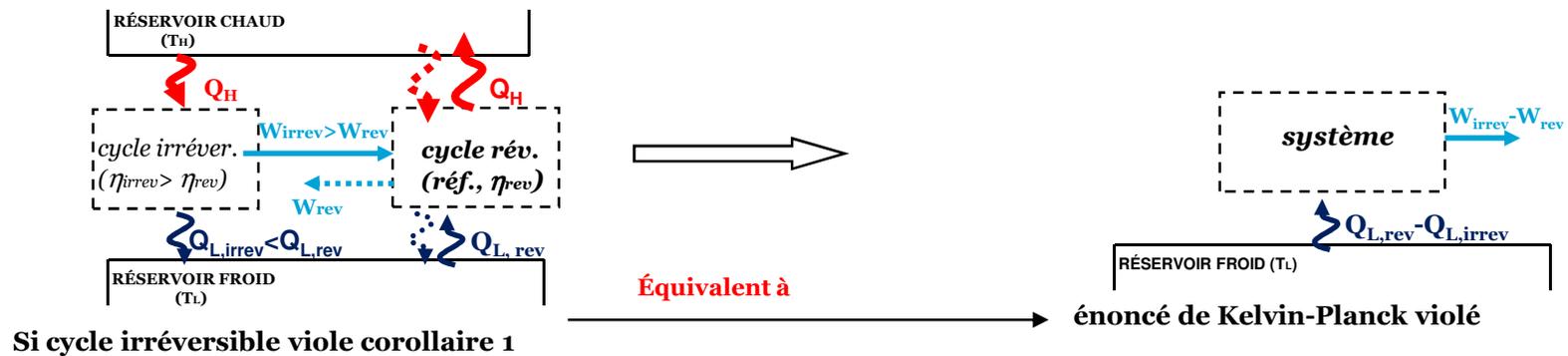
Pour un cycle opérant entre deux réservoirs:



$$\Rightarrow \eta_{th} = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Corollaire 1 : Le rendement d'un cycle irréversible est inférieur à celui du cycle réversible entre les mêmes réservoirs.

Preuve:

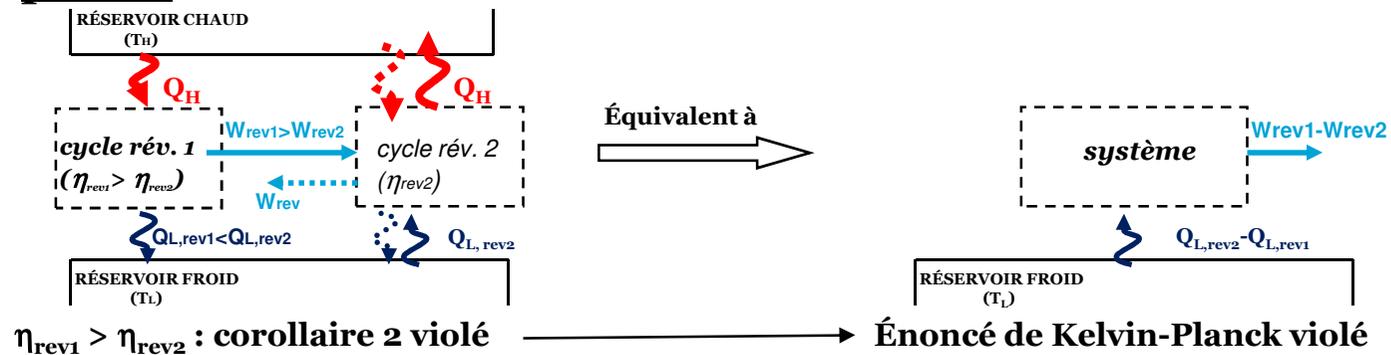


Corollaires du second principe

Corollaires du second principe (cont.)

Corollaire 2 : Tous les cycles réversibles opérant entre les mêmes réservoirs ont le même rendement

preuve:



Note: - Selon ces corollaires, le rendement du cycle Carnot représente le maximum rendement possible d'un cycle opérant entre deux réservoirs, c'est-à-dire:

$$\eta_{th,max} = 1 - \left(\frac{Q_L}{Q_H} \right)_{rev}$$

Échelle de température Kelvin

6) Échelle de Température Kelvin

❖ Une échelle de température thermodynamique (c'est-à-dire indépendante des propriétés de la matière) peut être définie avec le deuxième principe.

corollaires 1 & 2: Rendement max. ne dépend que des réservoirs T_H et T_L



$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{th, rev} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H) \\ \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H) \end{array} \right.$$

Donc, l'échelle de température Kelvin est définie de tel que:

$$\boxed{\left(\frac{Q_L}{Q_H} \right)_{\text{Cycle reversible}} = \frac{T_L}{T_H}}$$

- Indépendant de la matière
- Zéro à l'infini
- Point triple de l'eau à 273.16K

Échelle de température Kelvin

6) Échelle de Température Kelvin (cont.)

- Le rendement du cycle Carnot (limite absolue) est:

$$\eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

- Coefficients de performance d'un cycle Carnot inversé sont:

Réfrigérateur:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_L} - 1}$$

Pompe thermique:

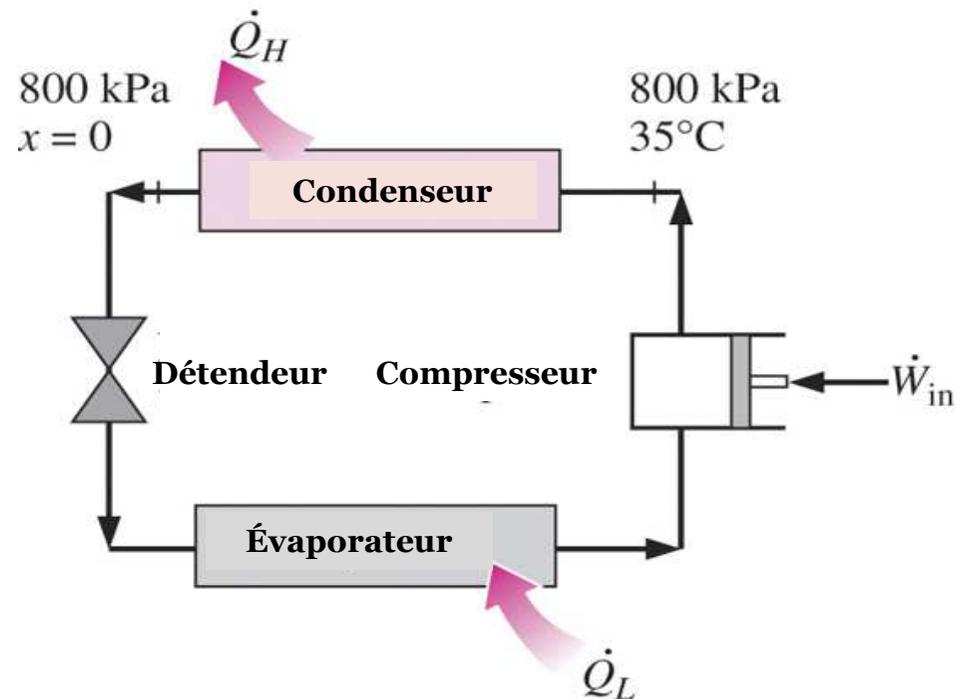
$$COP_{PT,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

Exemple 3(Exo. 6.47)

le réfrigérant R-134a pénètre dans le condenseur d'une thermopompe domestique à 800kPa et à 35°C avec un débit de 0.018 kg/s et en ressort sous forme de liquide saturé à 800kPa. Le compresseur de la thermopompe consomme une puissance électrique de 1.2kW. Déterminez:

- 1) Le COP de la thermopompe
- 2) Le taux auquel la chaleur est extraite de l'air extérieur.

Solution (en classe)



Exemple 4 (Exo. 6.83)

Un réfrigérateur de Carnot fonctionne dans un environnement où la température est de 25°C . Le coefficient de performance du réfrigérateur est de 4.5, et celui-ci consomme 500W. Déterminez:

- 1) Le taux auquel de la chaleur est extraite du réfrigérateur
- 2) la température du milieu réfrigéré

Solution (en classe)

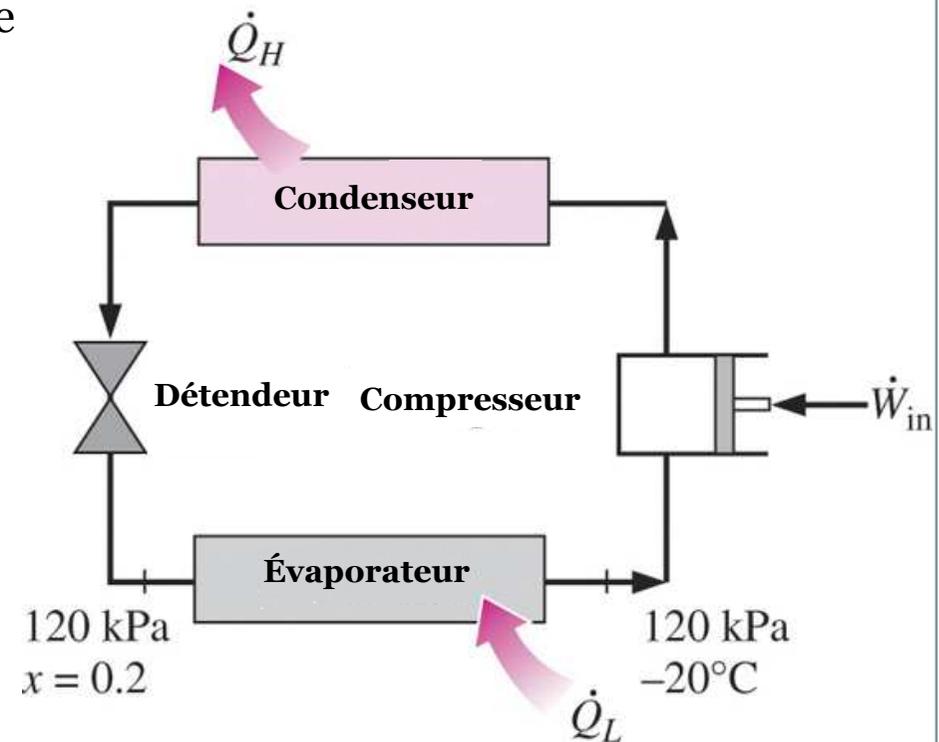
Exemple 5 (Exo. 6-48)

Le réfrigérant R-134a pénètre dans le serpentin de l'évaporateur situé dans un congélateur domestique à 120kPa avec un titre de 20% et en ressort à 120kPa et à -20°C .

Déterminez:

- 1) Le débit massique du fluide frigorigène
- 2) Le taux auquel de la chaleur est rejetée dans la cuisine. Le compresseur consomme 450W, et le COP du réfrigérateur est de 1.2

Solution (en classe)



Lecture suggérée

Sections **6.1** à **6.9** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y. Cengel, M. Boles, M. Kanoğlu et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2019.