

# MEC1210\_Thermodynamique (Heures 18-21)

## *Second principe de la thermodynamique*



*Smail Guenoun*

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

# Objectifs

---

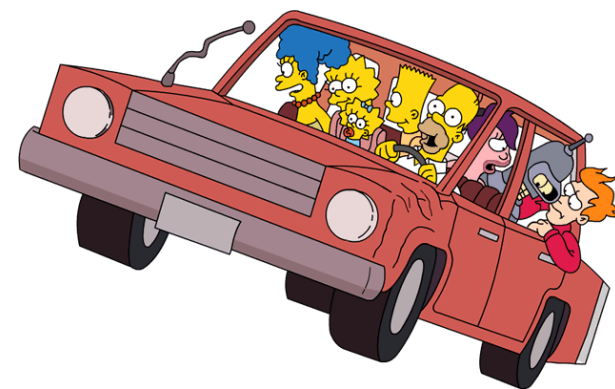
- ❖ **Présenter les insuffisances du principe de la thermodynamique**
- ❖ **Discuter de l'utilité du second principe de la thermodynamique**
- ❖ **Présenter et appliquer la deuxième loi de la thermodynamique**
- ❖ **Définir le cycle et le rendement de Carnot**
- ❖ **Définir des expressions qui prédisent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

# Introduction

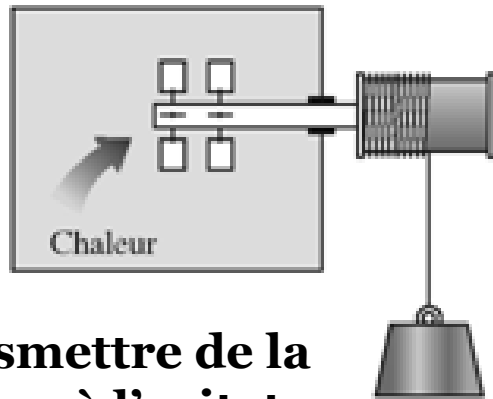


**Une tasse de café ne se réchauffe pas dans un environnement plus froid**

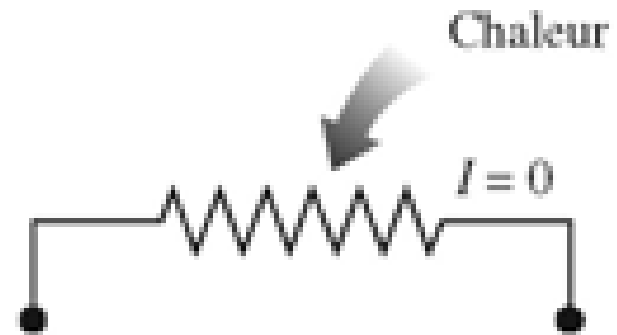
**Une voiture consomme de l'essence lorsqu'on lui fait monter une pente mais, lors de la descente, l'essence ne va pas revenir à son niveau initial dans le réservoir.**



# 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.

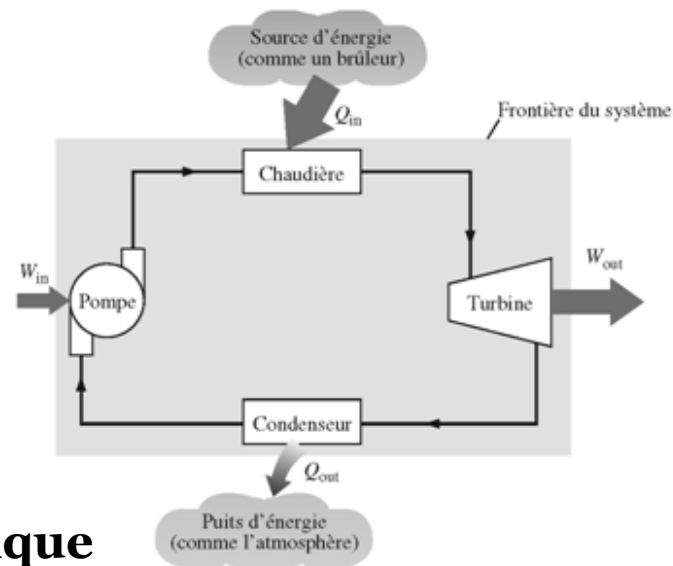


# Définitions

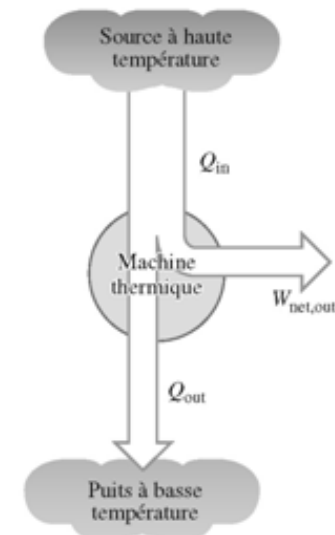
## Machines thermiques

- ✓ 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**.

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

## Réfrigérateur et pompe thermique :

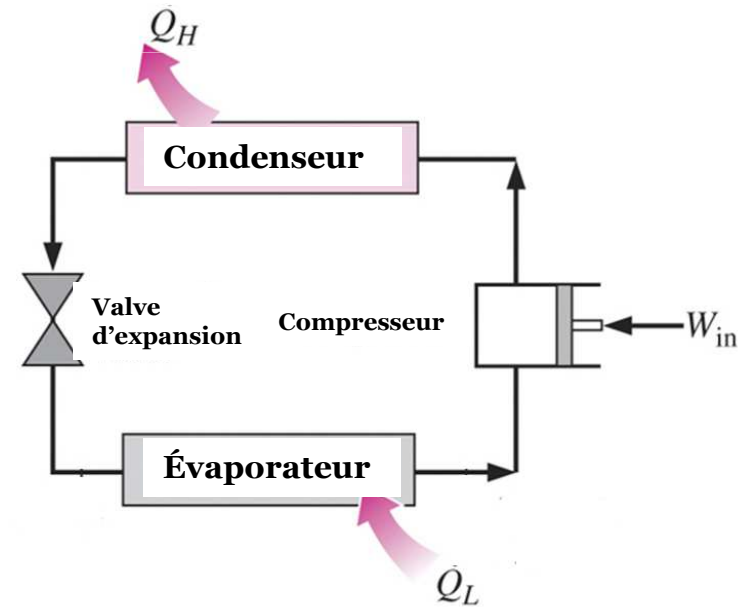
Un système qui *requiert* du travail pour transférer de la chaleur d'un réservoir à basse température à un réservoir à haute température .

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

**Réfrigérateur:** 
$$COP_R = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{\text{Obtenu}}{\text{Dépensé}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

**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:** 
$$COP_{PT} - COP_R = 1 \text{ ou } COP_{PT} = COP_R + 1$$

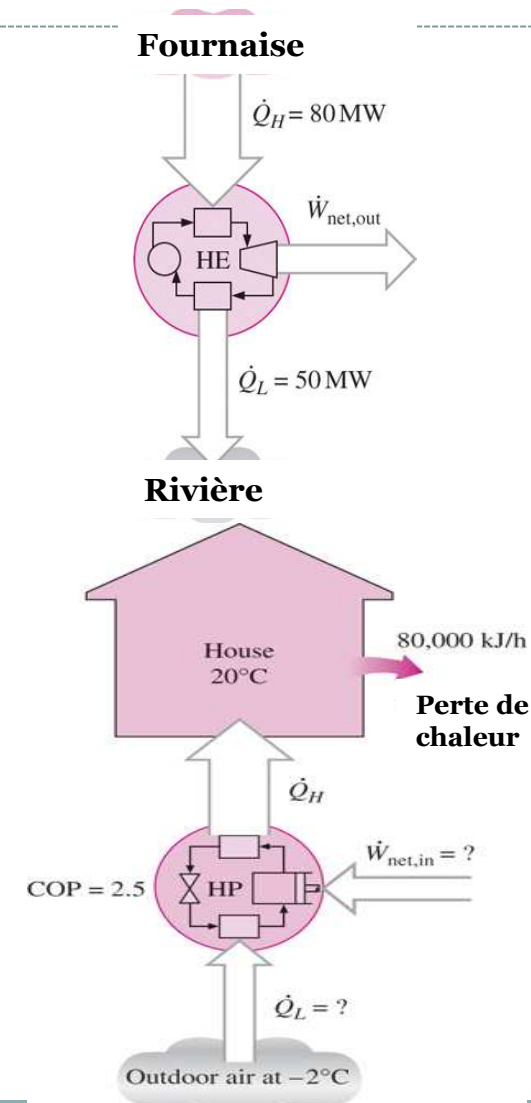




# Définitions

## Exemple 6.1

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 6.4

Une thermopompe est employée pour chauffer une maison et maintenir la température intérieure à  $20^\circ\text{C}$ . lorsque la température extérieure est de  $-2^\circ\text{C}$ , on estime que la puissance thermique perdue par la maison est de  $80000 \text{ kJ/h}$  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

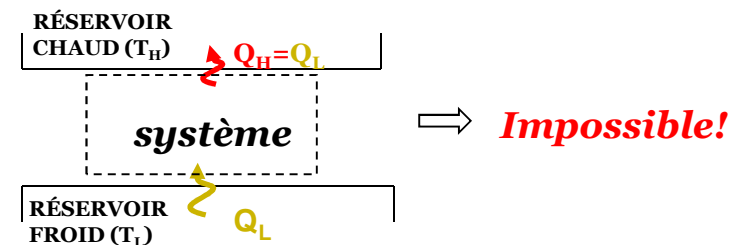
# Second principe de la thermodynamique

## 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

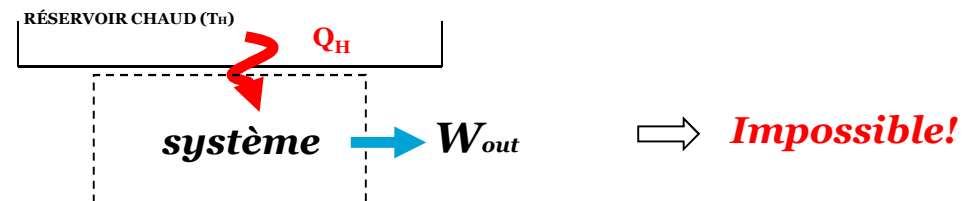
*Aucun système ne peut uniquement (c'est-à-dire sans apport de l'environnement) transmettre de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud*



**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*

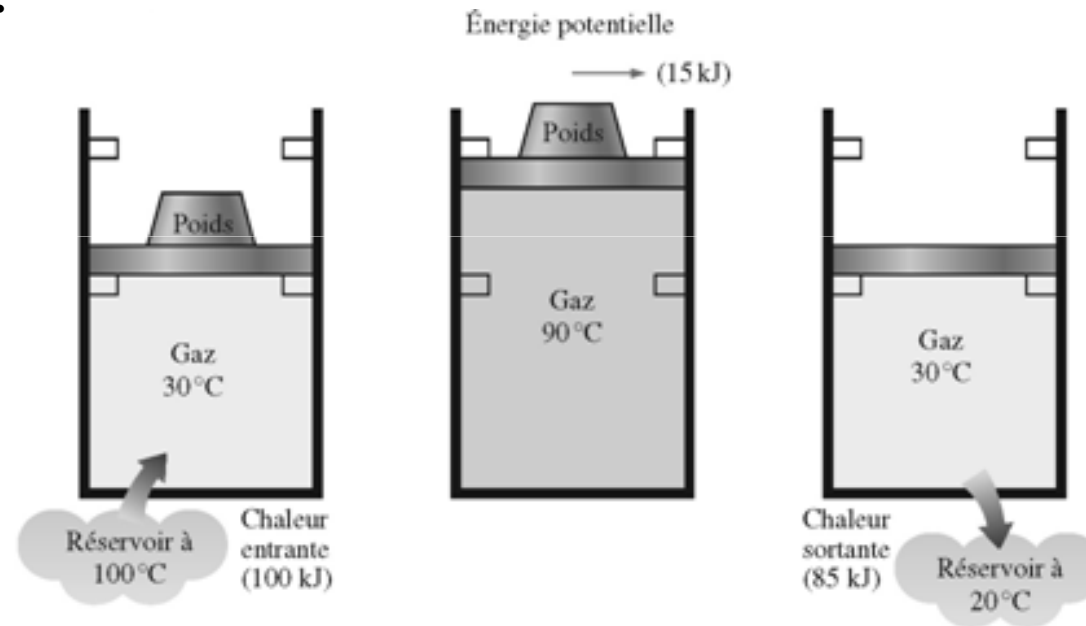


# Second principe de la thermodynamique

## b) Énoncé de Kelvin-Planck (cont.)

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

**Exemple:**



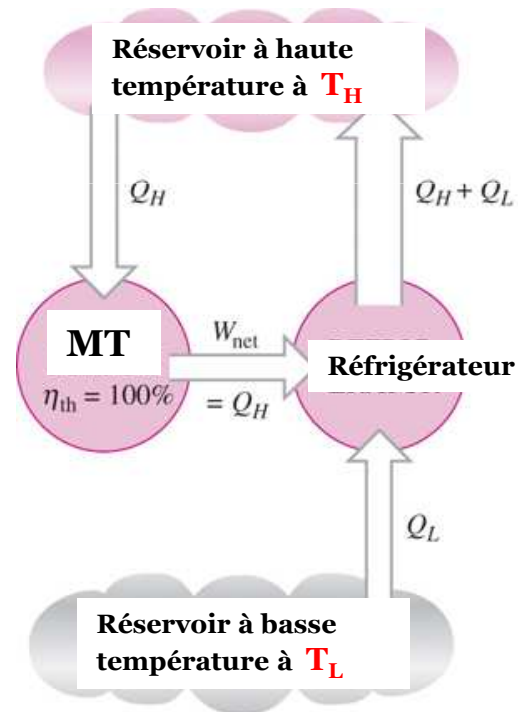
Donc, seulement une partie de  $Q_H$  peut être convertie en travail ( $W=Q_H-Q_L$ ), sacrifiant  $Q_L$

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

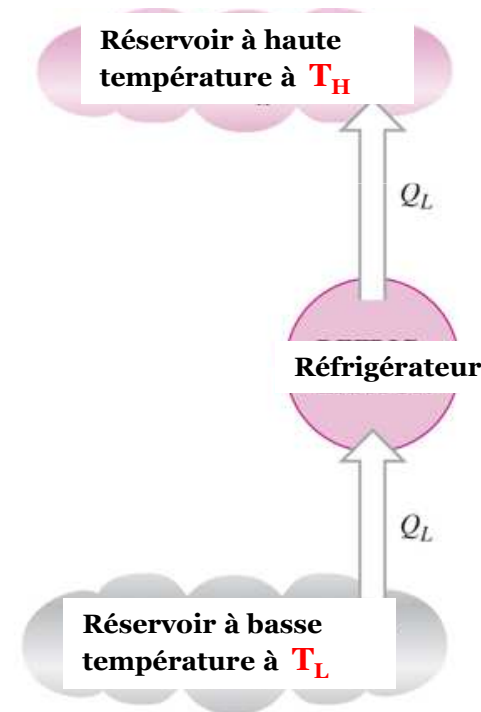
# Second principe de la thermodynamique

## 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%

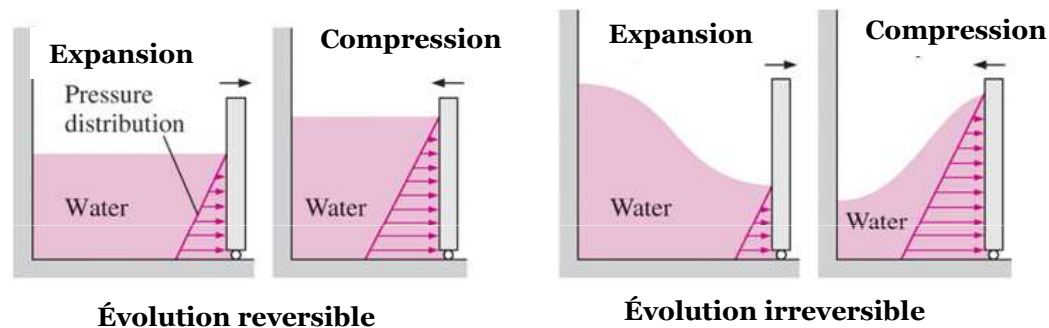


Réfrigérateur équivalent

# 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

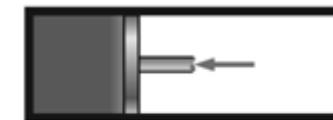
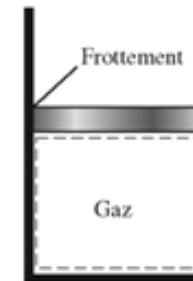
# Second principe de la thermodynamique

## 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:

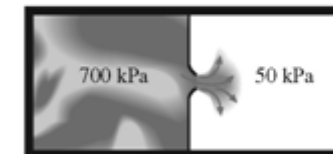
- friction
- mélange de deux ou plusieurs fluides
- résistance électrique
- déformation inélastique
- réaction chimique
- évolution ou expansion rapide (non quasi-statique)
- Détente libre d'un gaz
- transfert de chaleur à travers une différence de température



a) Compression rapide.



b) Détente rapide.



c) Détente libre.

# Second principe de la thermodynamique

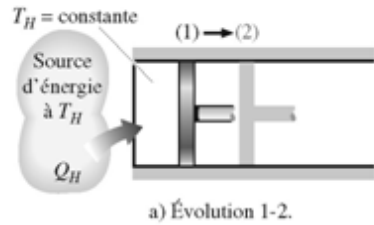
---

## Notes:

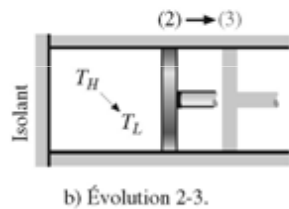
- une évolution est intérieurement réversible si le système ne contient *aucun* facteur d'irréversibilité à l'intérieur de ses frontières
- une évolution est extérieurement réversible s'il n'y a *aucun* facteur d'irréversibilité à l'extérieur des frontières du système
- une évolution est (totale)ment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

# Cycle de Carnot

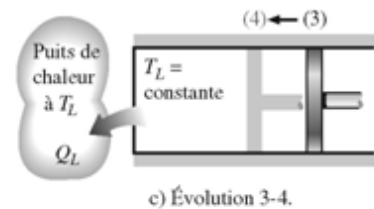
Cycle de production d'énergie composé de quatre évolutions *réversibles* pour décrire un moteur thermique optimal.



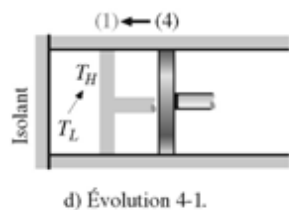
**Expansion isothermique quasi-statique.**  
**Transfert de chaleur réversible au système.**  
**Travail fait sur l'environnement**



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

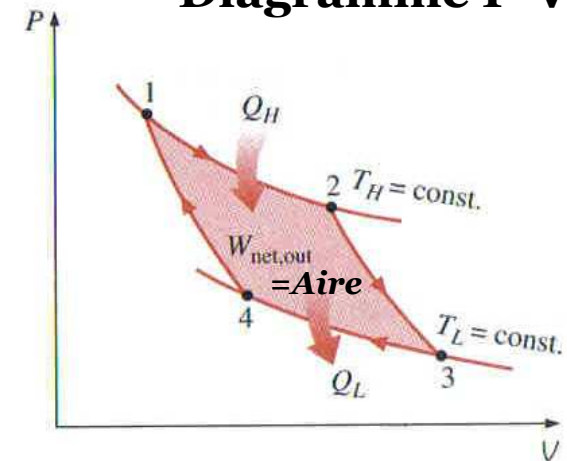


**Compression isothermique quasi-statique.**  
**Transfert de chaleur réversible à l'environnement.**  
**Travail fait sur système.**



**Compression adiabatique quasi-statique.**  
**Travail fait sur système.**

## Diagramme P-V

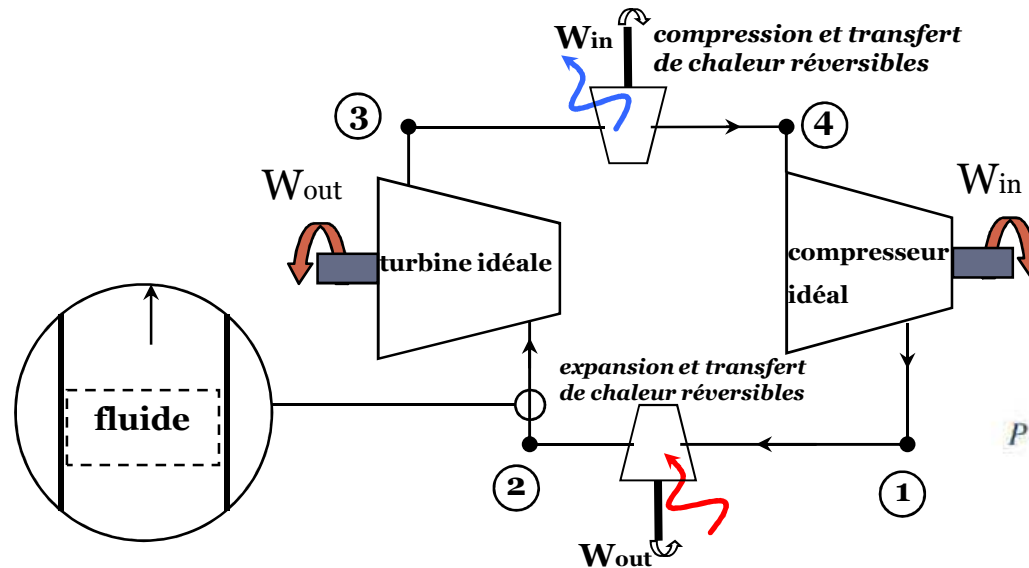




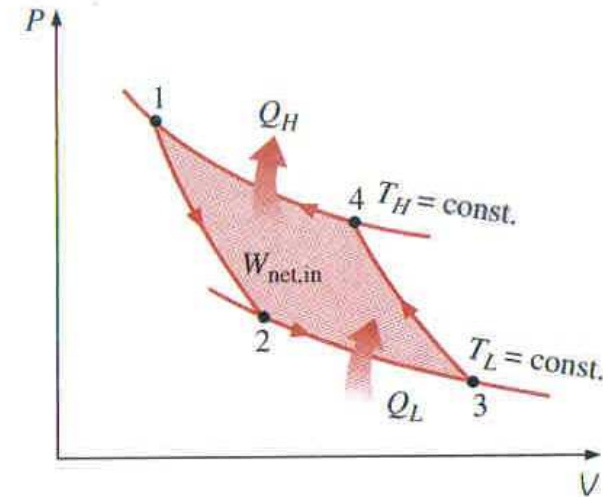
# Cycle de Carnot

## Notes:

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



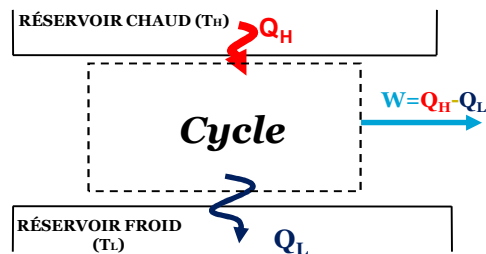
- Le cycle Carnot inversé = cycle de réfrigération optimale



# Corollaires du second principe

## 5) Corollaires du second principe

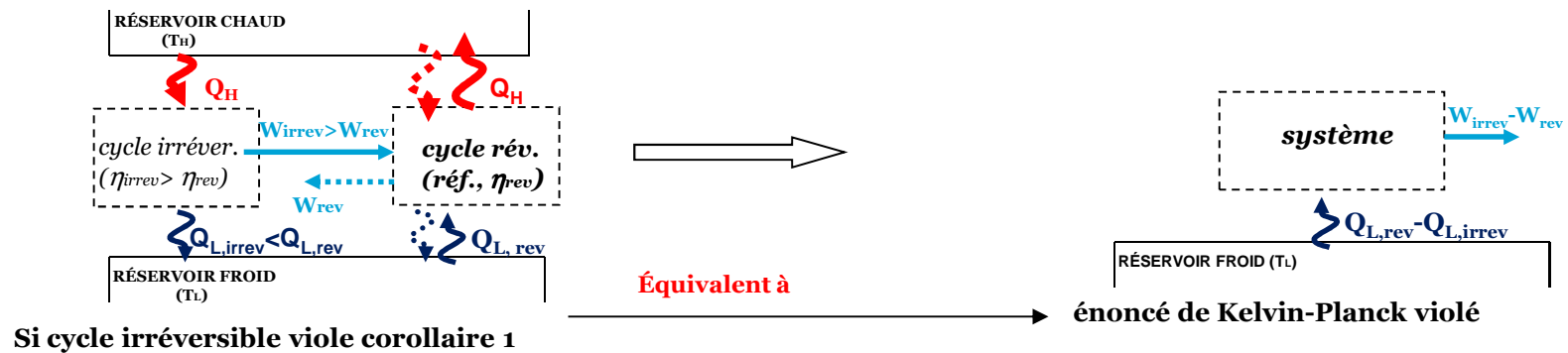
Pour un cycle opérant entre deux réservoirs:



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

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

**Preuve:**

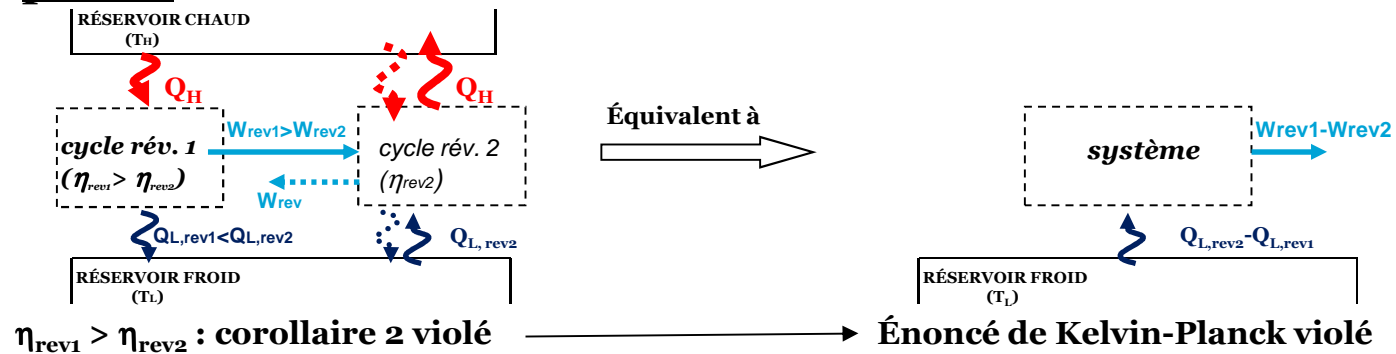


# Corollaires du second principe

## 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:

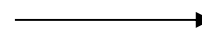
$$\eta_{th,max} = 1 - \left( \frac{Q_L}{Q_H} \right)_{rev}$$

# 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  $T_L$



$$\begin{cases} \eta_{th,rev} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H) \\ \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H) \end{cases}$$

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

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

- 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:

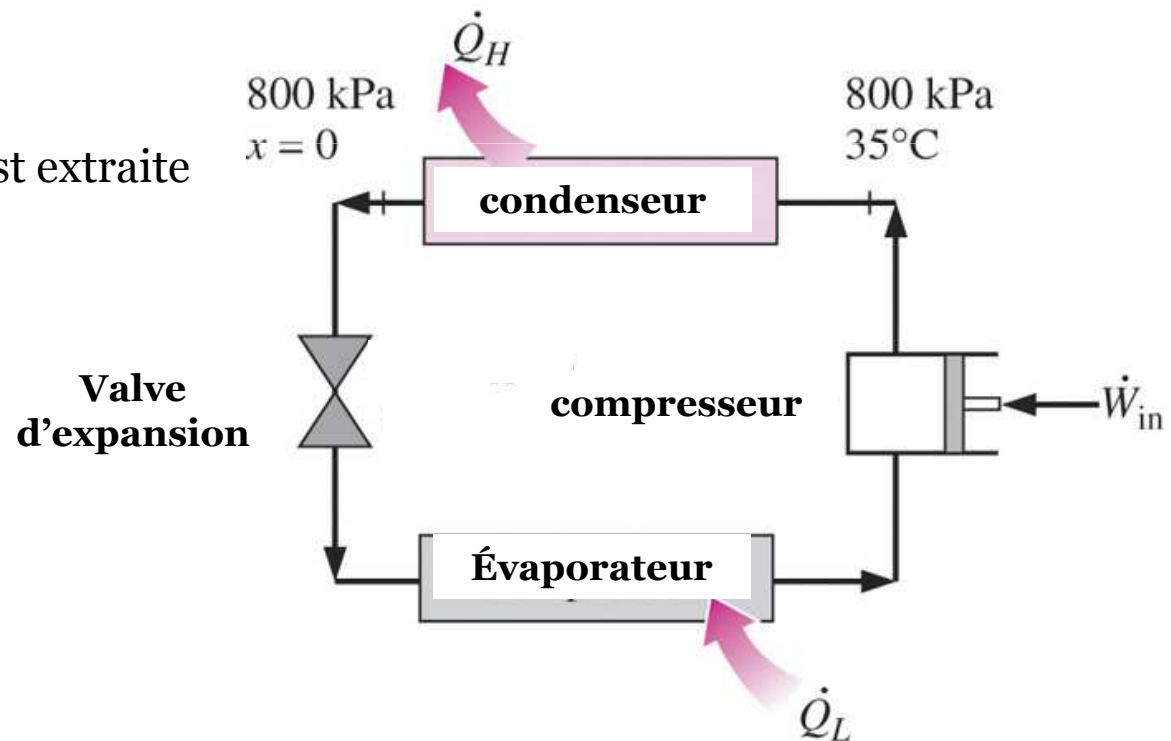
$$COP_{PT,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

# Exemple

## Exercice 6-48

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.



# Exemple

---

## Exercice 6-85

Un réfrigérateur de Carnot fonctionne dans un environnement où la température est de  $25^{\circ}\text{C}$ . 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

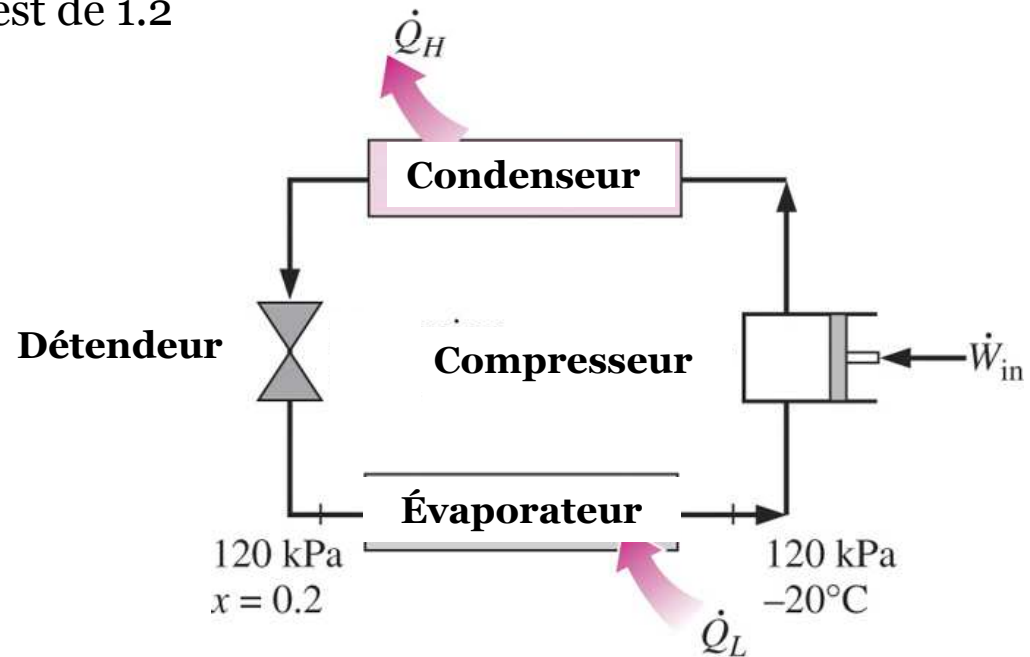
# Exemple

## Exercice 6-49

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  $-20^{\circ}\text{C}$ .

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





# Lecture suggérée

---

Sections **6.1 à 6.9** du livre, «**Thermodynamique, une approche pragmatique**», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2008.