

# MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: RAMDANE YOUNSI  
BUREAU: C-318.1  
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 4579  
COURRIEL: ramdane.younsi@polymtl.ca

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

# Chapitre 6: Second principe de la thermodynamique

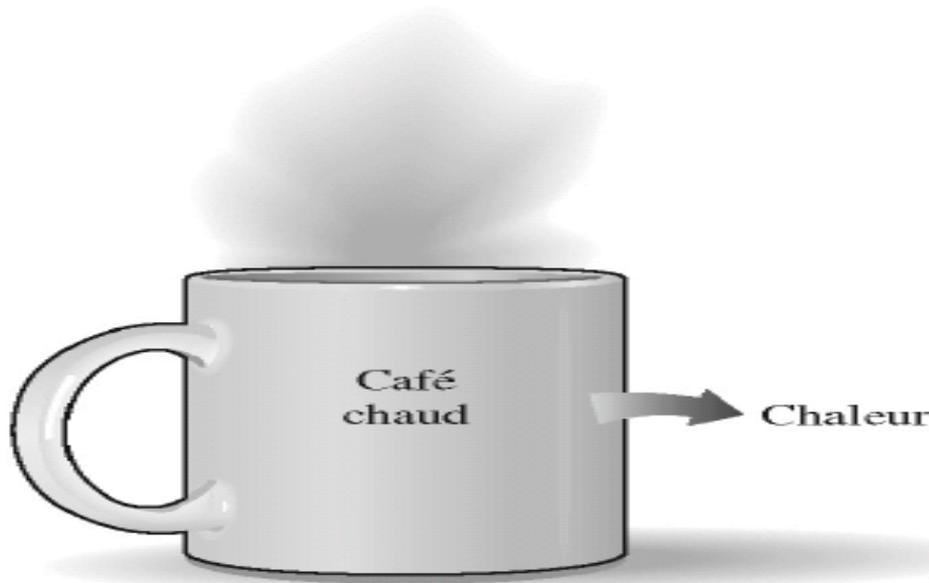
## OBJECTIFS

- Formuler la deuxième loi de la thermodynamique selon les énoncés de Clausius et Kelvin-Planck.
- Décrire les évolutions réversibles et irréversibles
- Décrire le cycle de Carnot.
- Recourir à la deuxième loi en vue définir une échelle de température thermodynamique.

## 1) Introduction

### a) Insuffisance du 1er principe de la thermodynamique

Il existe un sens naturel d'évolution pour plusieurs phénomènes courants. Le premier principe de la thermodynamique n'impose aucune restriction quant au sens dans lequel la chaleur est transmise ou le travail effectué.



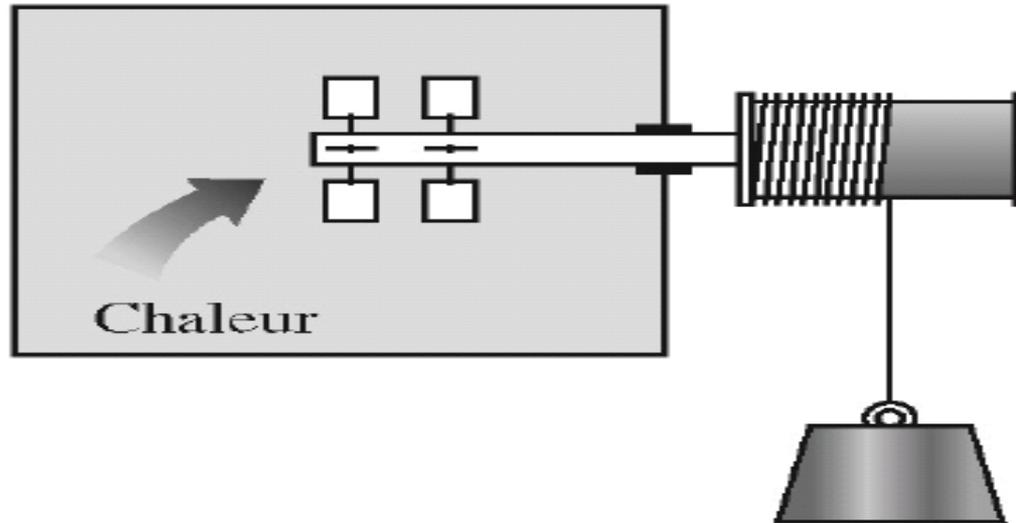
**FIGURE 6.1**

La tasse de café chaud ne se réchauffe pas dans un environnement plus froid.



**FIGURE 6.2**

Transmettre de la chaleur au fil ne restitue pas le courant électrique.



**FIGURE 6.3**

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

- ❑ La première loi n'impose aucune restriction quant au sens d'une évolution (les deux directions sont permises).
- ❑ Cette restriction est dictée par le second principe de la thermodynamique
- ❑ Une évolution doit satisfaire le premier **ET** le second principe pour se réaliser

## Utilité du second principe

- Prédire le sens d'une évolution.
- Comme toutes les lois de la science, la 2<sup>ème</sup> loi de la thermodynamique repose sur l'observation expérimentale.
- Déterminer le meilleur rendement possible de cycles, machines et systèmes.
- Déterminer quantitativement les irréversibilités qui réduisent le rendement.
- Établir les conditions d'équilibre d'un système.

## b) Définitions

### i) réservoir thermique

C'est un réservoir de grande capacité thermique (Masse x Chaleur massique  $\gggg$ ) qui peut fournir ou absorber de la chaleur indéfiniment sans que sa température en soit modifiée.

- Solide: sol.
- Liquide: océan, lac, rivière.
- Gaz: atmosphère.

### ii) machine thermique

Un système qui *produit* du travail à partir de la chaleur.

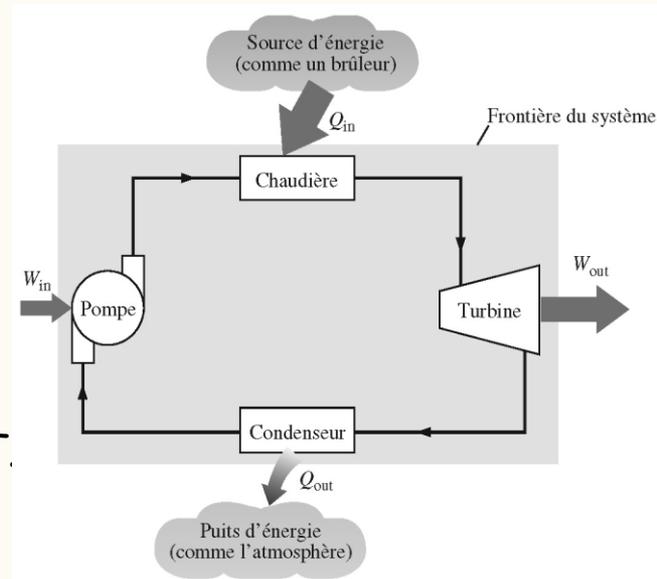
ex.: centrale thermique

Caractéristiques:

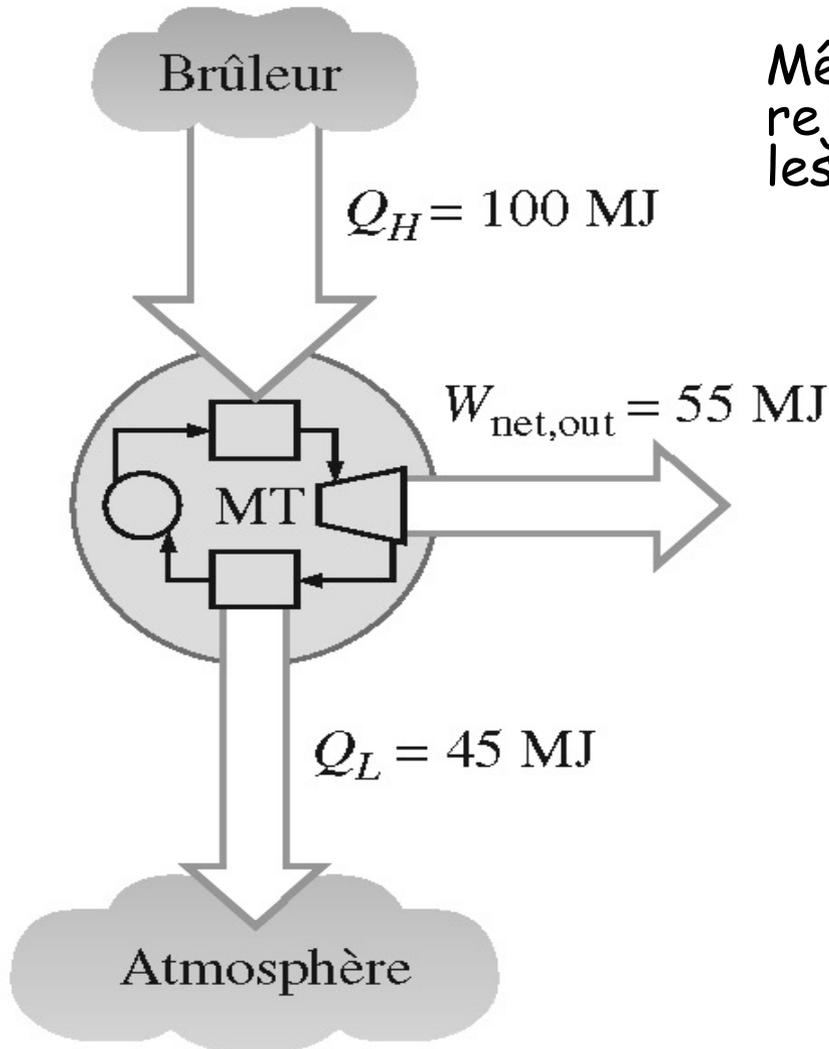
1. Recoit de la chaleur d'une source chaude (haute T)
2. Convertit une partie de chaleur en travail (tourner l'arbre)
3. Rejette de la chaleur restante dans un réservoir de basse T.
4. Elle décrit un cycle

**rendement thermique  $\eta_{th}$**

$$\eta_{th} = \frac{OBTENU}{DÉPENSÉ} = \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$



## Exemple



Même les meilleures machines thermiques rejettent près de la moitié de l'énergie qui les alimente en chaleur.

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{100 - 45}{100} = 55\%$$

## Exercice

Le rendement thermique d'une centrale thermique de 600MW refroidi par une rivière est de 40%. Déterminer la puissance thermique rejetée dans la rivière . La puissance thermique réelle transmise à la rivière est-elle plus grande ou plus petite que cette valeur?

## Solution (en classe)

$$\dot{Q}_L = 900MW$$

### iii) Réfrigérateur et pompe thermique

Un système qui requiert du travail pour maintenir un milieu à haute température en allant puiser de la chaleur dans un milieu à basse température (fonctionnement inverse d'un moteur thermique).

- réfrigérateur: garde  $T_L$  constant
- pompe thermique: garde  $T_H$  constant

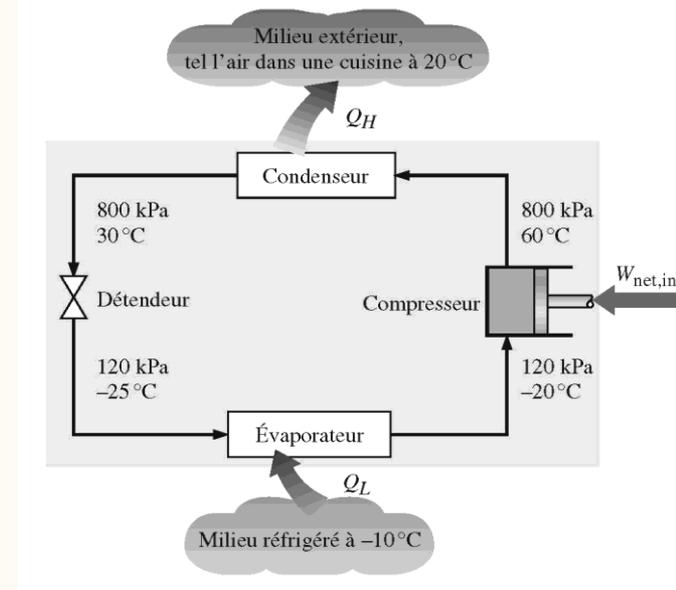
Coefficient de performance réfrigérateur ,  $COP_R$

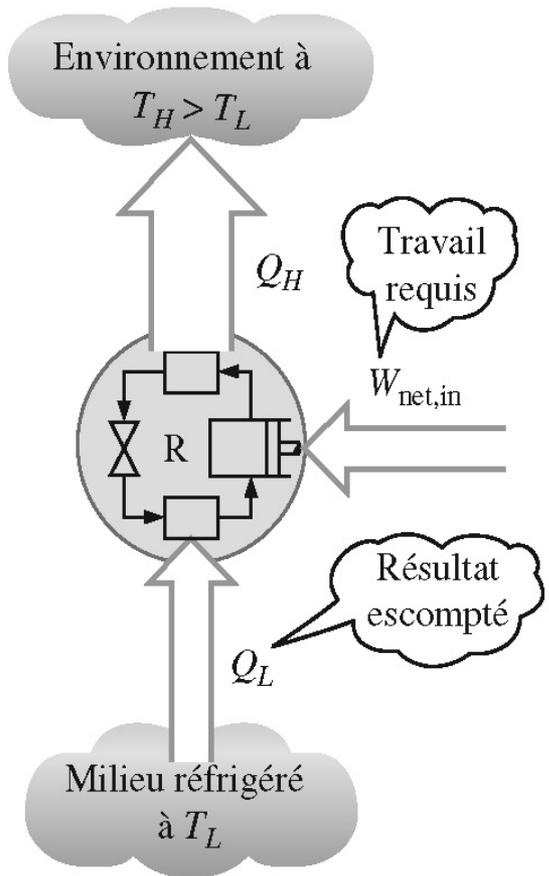
$$COP_R = \frac{OBTENU}{DÉPENSÉ} = \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

Coefficient de performance pompe thermique,  $COP_{PT}$

$$COP_{PT} = \frac{OBTENU}{DÉPENSÉ} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

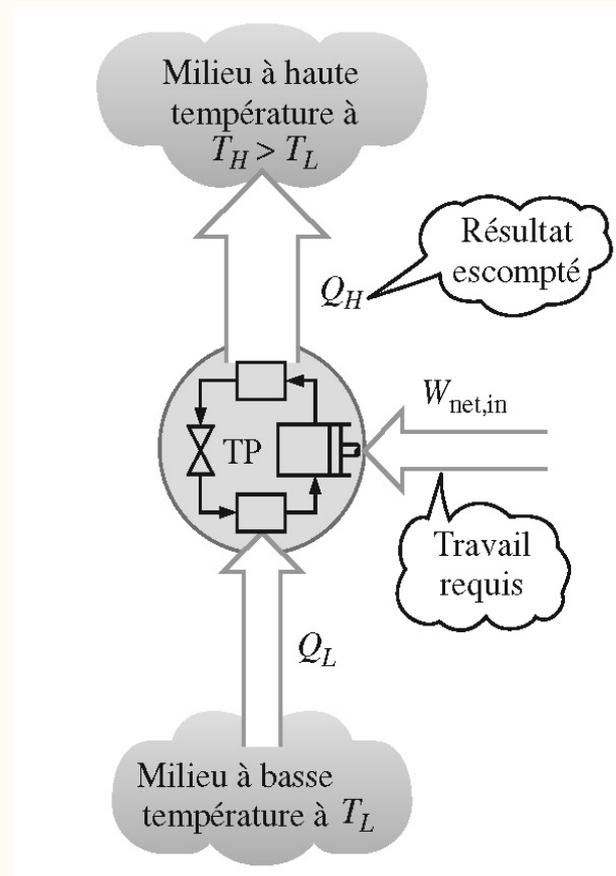
Note:  $COP_{PT} - COP_R = 1$





### Réfrigérateur

$$COP_R = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$



### Pompe thermique

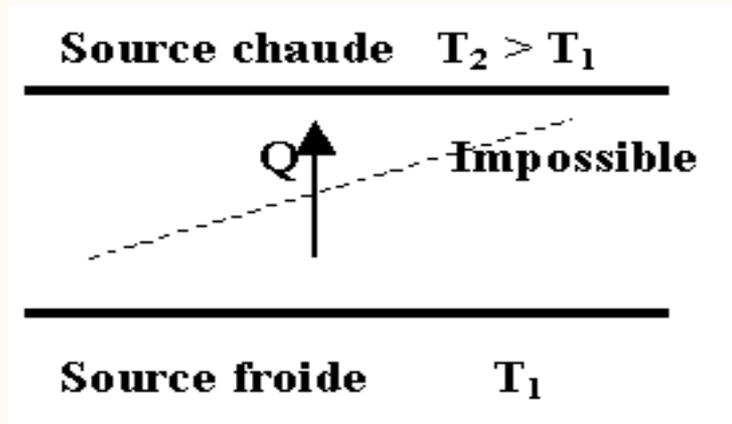
$$COP_{PT} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

## 2) Énoncés du second principe de la thermodynamique

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

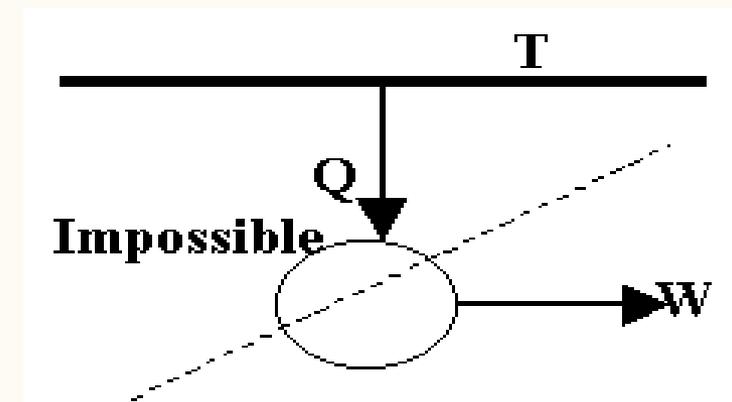
### a) Énoncé de Clausius

*Il est impossible de réaliser un appareil décrivant un cycle dont le seul effet serait de transférer une quantité de chaleur d'une source froide à une source chaude.*



### b) Énoncé de Kelvin-Planck

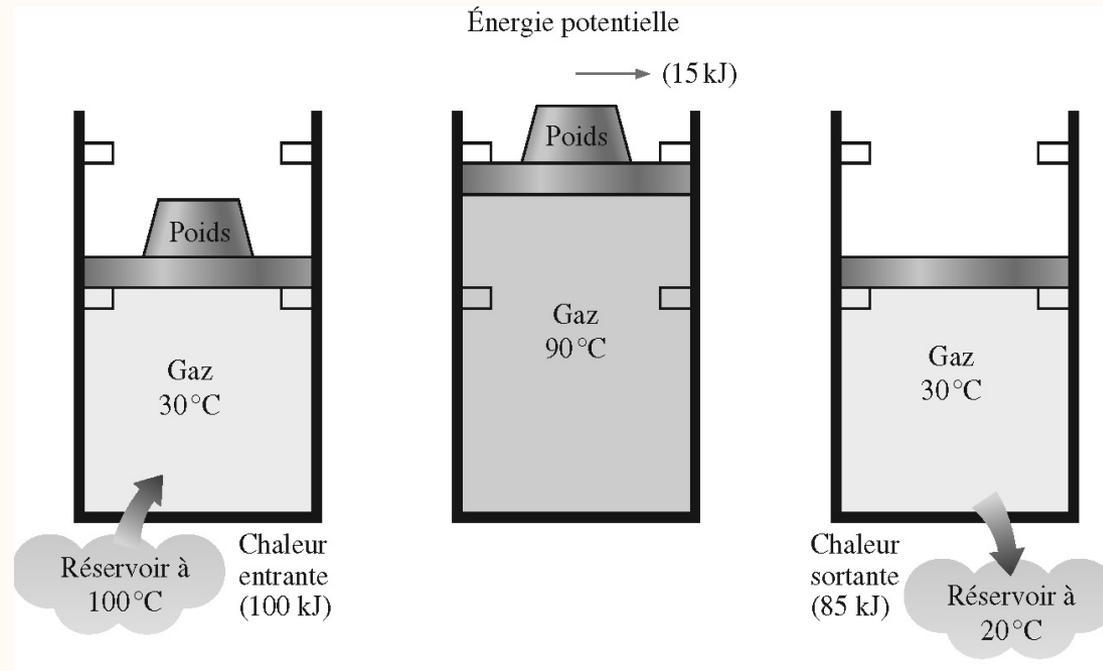
*Aucun système ne peut accomplir un cycle et effectuer un travail net sur l'environnement en recevant de la chaleur d'un seul réservoir.*



## b) Énoncé de Kelvin-Plank (cont.)

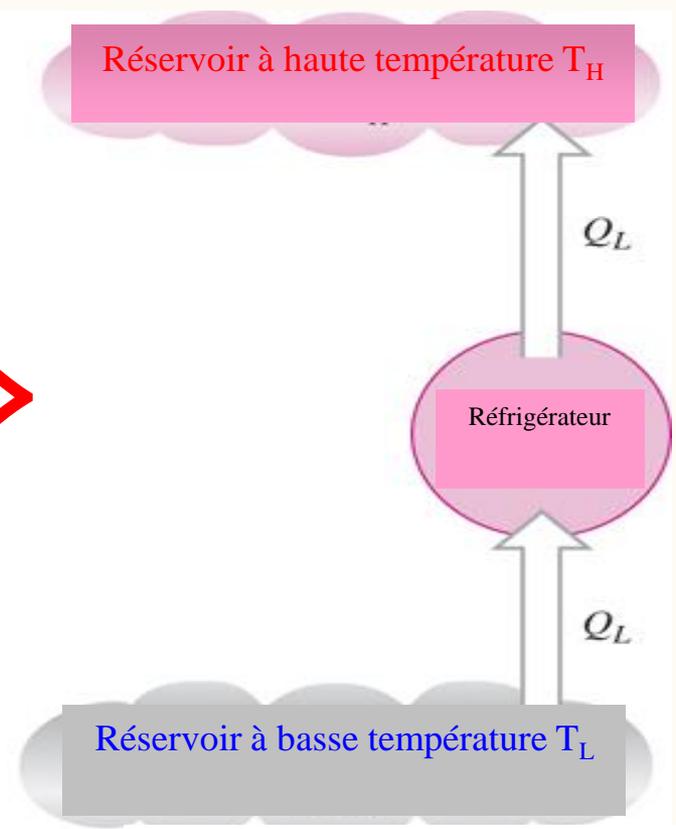
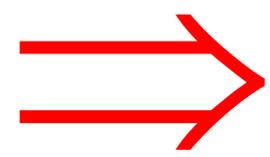
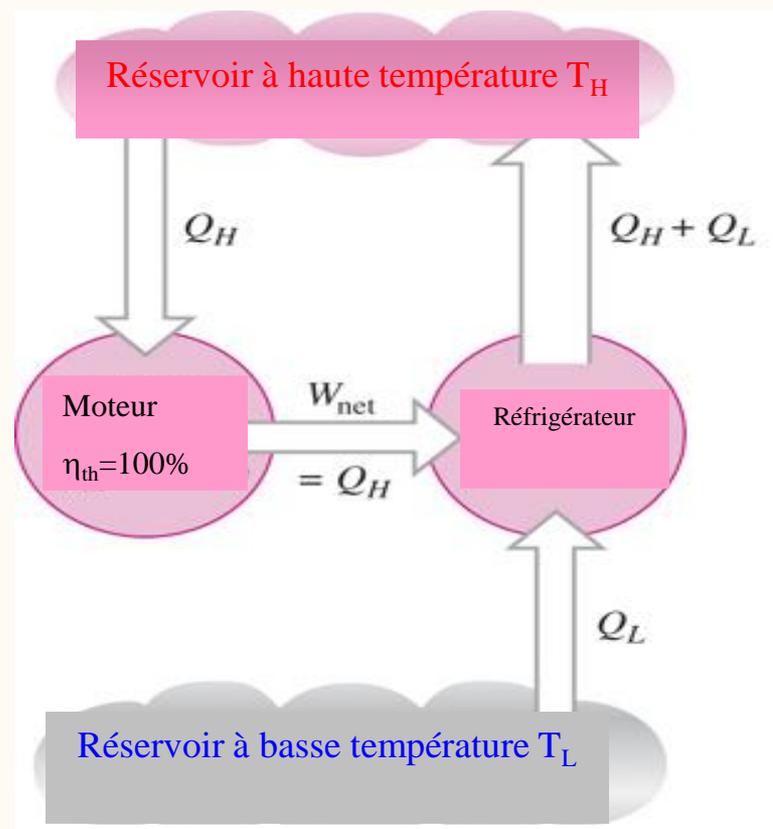
Physiquement: on ne peut convertir 100% de la chaleur en travail ( $\eta_{th} < 1.0$ )

Exemple:



100 kJ de chaleur sont transmis d'un réservoir à 100°C au gaz dans le piston. 85 kJ servent à augmenter la température du gaz de 30°C à 90°C et 15 kJ servent à soulever la masse. Est-il possible de récupérer les 85 kJ de chaleur du gaz à 90°C en les transmettant au réservoir à 100°C?

c) Équivalence des deux énoncés



Énoncé de Kelvin-Planck violé

Énoncé de Clausius violé

### 3) Évolutions réversibles et irréversibles

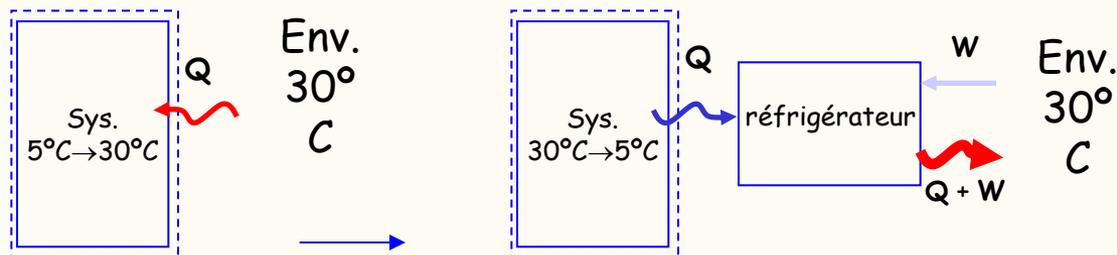
#### a) Évolution réversible

- Par définition, une évolution est réversible lorsque le système et l'environnement peuvent revenir à leur état initial à la fin. C'est-à-dire sans apport de  $Q$  ou  $W$  de l'extérieur.
- En pratique, toutes les évolutions sont irréversibles. La mission de l'ingénieur est souvent de déterminer ces irréversibilités et de les réduire.
- Les causes d'irréversibilité les plus courantes sont le frottement, la détente non contrôlée, le transfert de chaleur spontané, etc.

#### b) Évolution irréversible

Une évolution qui n'est pas réversible, c'est-à-dire qui laisserait des traces sur l'environnement si le système est ramené à son état initial

ex.:



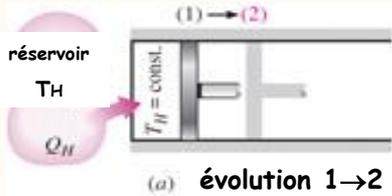
Évolution irréversible

## Note:

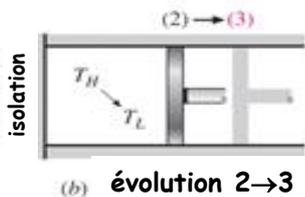
- une évolution est intérieurement réversible si le système ne contient aucun facteur d'irréversibilité à l'intérieur de ses frontières.
- une évolution est extérieurement réversible s'il n'y a aucun facteur d'irréversibilité à l'extérieur des frontières du système.
- une évolution est (totalement) réversible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

## 4) Cycle de Carnot

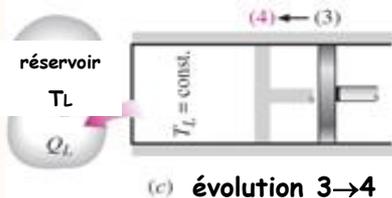
Cycle de production d'énergie composé de quatre évolutions *réversibles* pour décrire un moteur thermique optimal (*cycle idéal*).



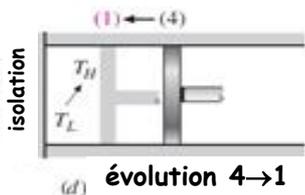
Expansion isothermique quasi-statique.  
Transfert de chaleur réversible au système.  
Travail fait sur l'environnement



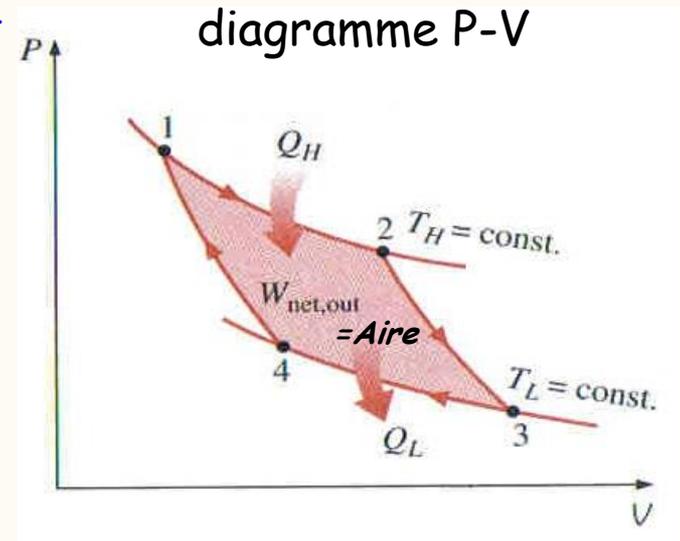
Expansion adiabatique quasi-statique.  
Travail fait sur l'environnement.



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

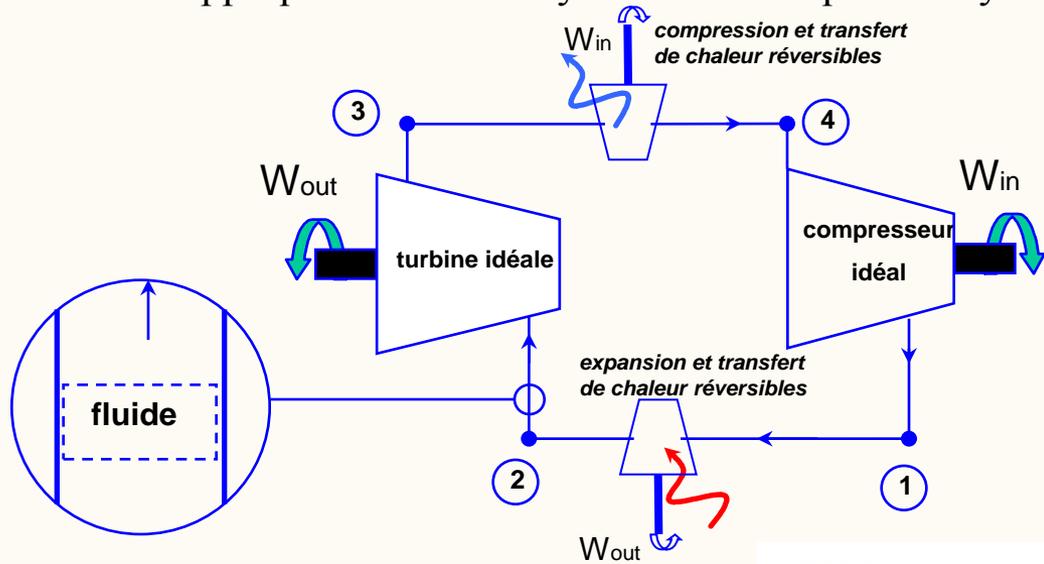


Compression adiabatique quasi-statique.  
Travail fait sur système.

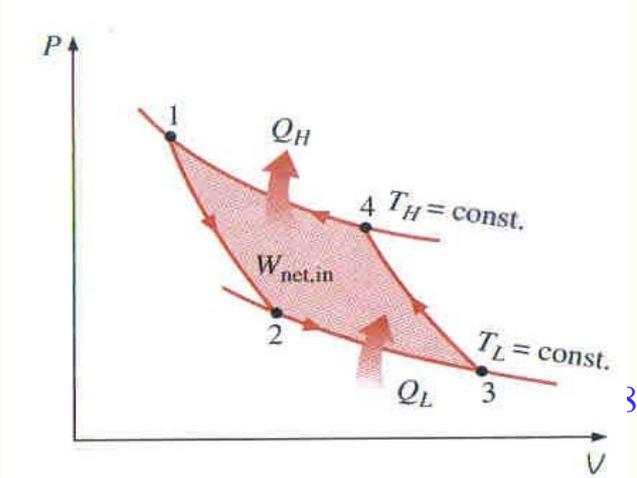


## 4) Cycle de Carnot (cont.)

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

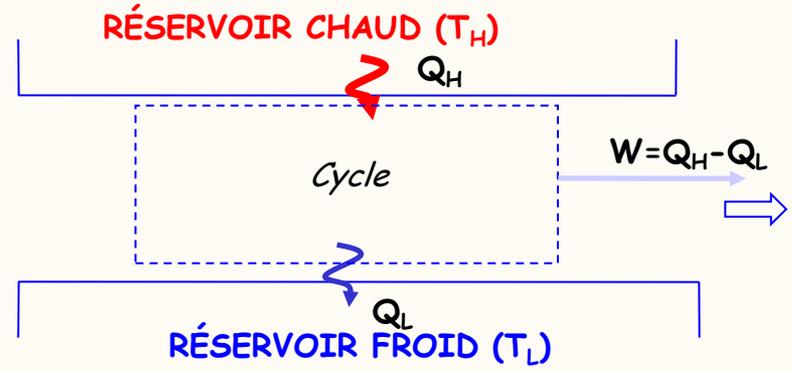


- Le cycle Carnot inversé = cycle de réfrigération optimale



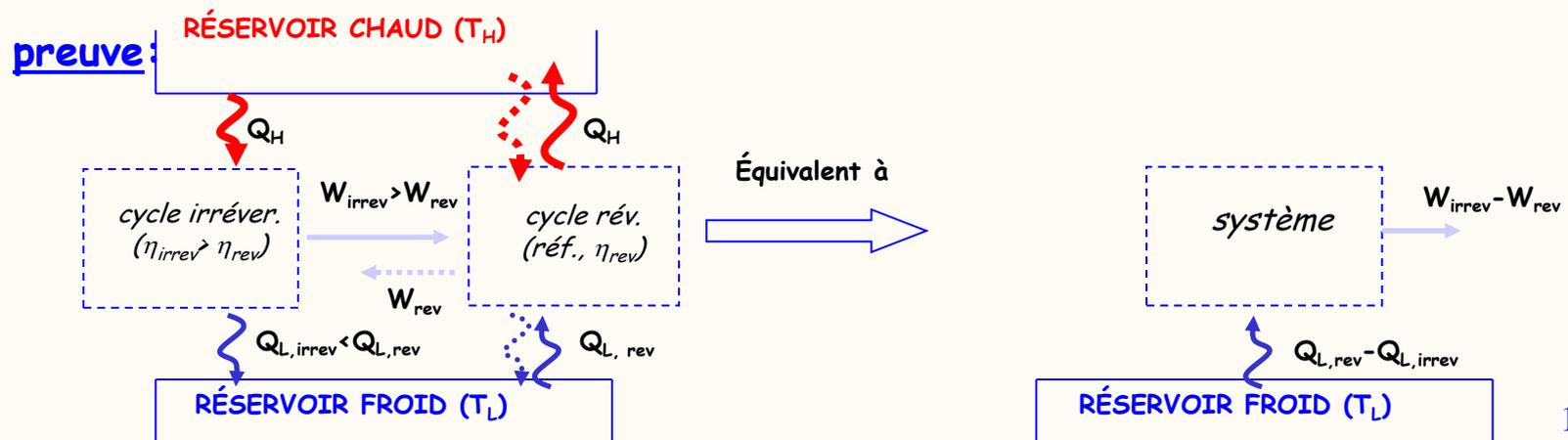
## 5) Corollaires du second principe

Pour un cycle opérant entre deux réservoirs:



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

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

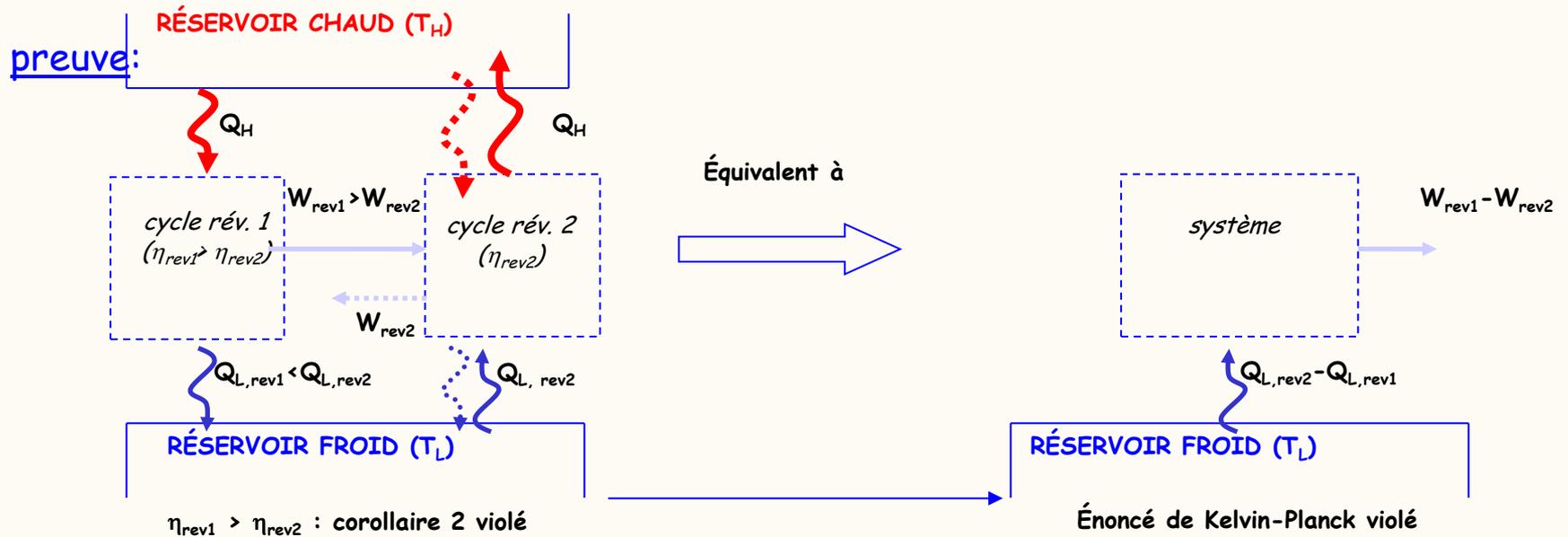


si cycle irréversible viole corollaire 1

énoncé de Kelvin-Planck violé

## 5) Corollaires du second principe (cont.)

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



**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:

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

## 6) Échelle de Température Kelvin

- ❑ Conséquence du deuxième principe de Carnot:  $\frac{Q_L}{Q_H}$  ne dépend que de la température des réservoirs.
- ❑ Ce rapport est indépendant des propriétés physiques et chimiques des substances.
- ❑ Échelle de température proposée:  $\left[ \frac{Q_L}{Q_H} \right]_{\text{cycle réversible}} = \frac{T_L}{T_H}$

## 6) Échelle de Température Kelvin (cont.)

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

## Exercices 6.35 C&B page 278

Soit un réfrigérateur domestique dont le coefficient de performance est de 1.2. le réfrigérateur extrait de la chaleur du milieu réfrigéré au taux de 60kJ/min.

Déterminez :

- La puissance électrique consommée par le réfrigérateur
- La puissance thermique évacuée dans la cuisine

### Solution (en classe)

a) 0.83kW

b) 110kJ/min

## Exercices 6.47 C&B page 280

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

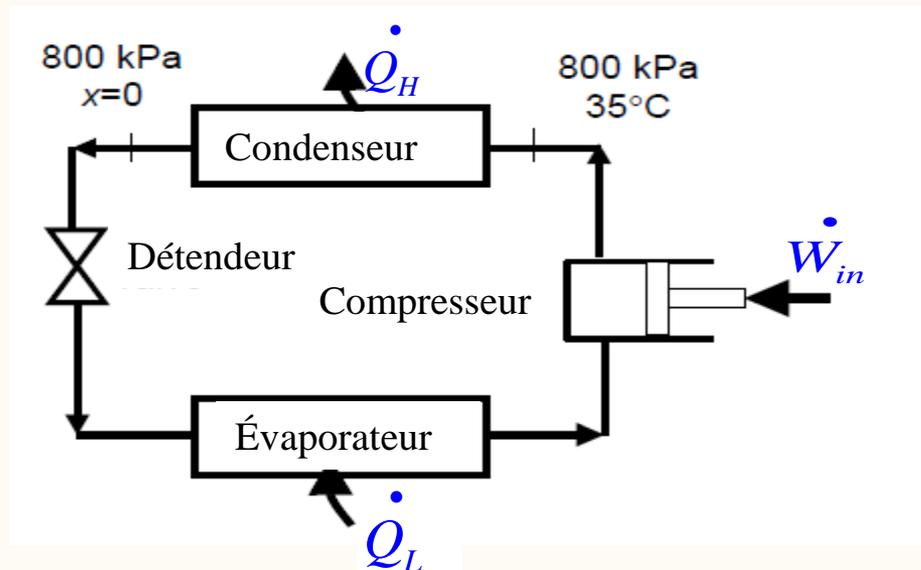
Déterminez :

- Le COP de la thermopompe
- Le taux auquel la chaleur est extraite de l'air extérieur

### Solution (en classe)

a) 2.64

b) 1.96kW



## Exercices 6.48 C&B page 280

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 :

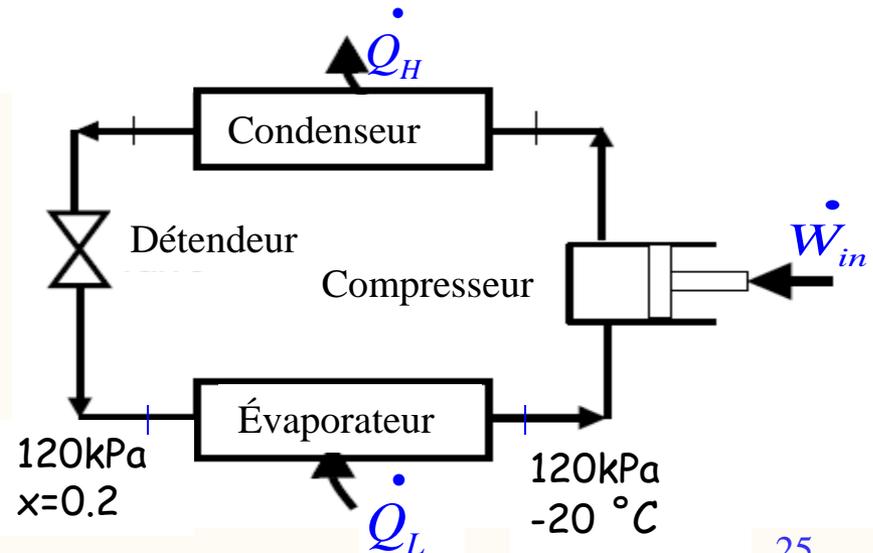
- Le débit massique du fluide frigorigène
- Le taux auquel la chaleur est rejetée dans la cuisine .

Le compresseur consomme 450W, et le COP du réfrigérateur est de 1.2

### Solution (en classe)

a) 0.0031kg/s

b) 0.99kW



## LECTURE SECTION DU LIVRE

Sections 6.1 à 6.9 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2ed 2014.