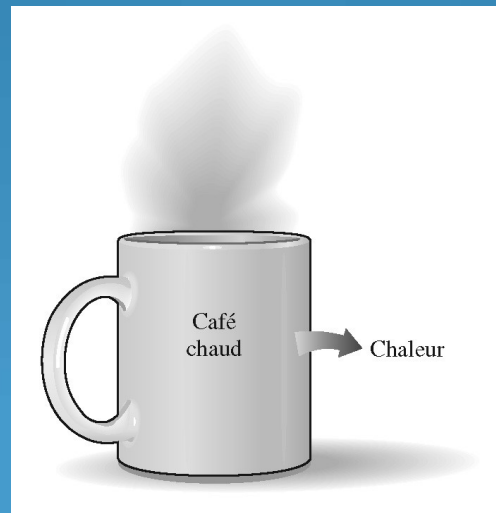


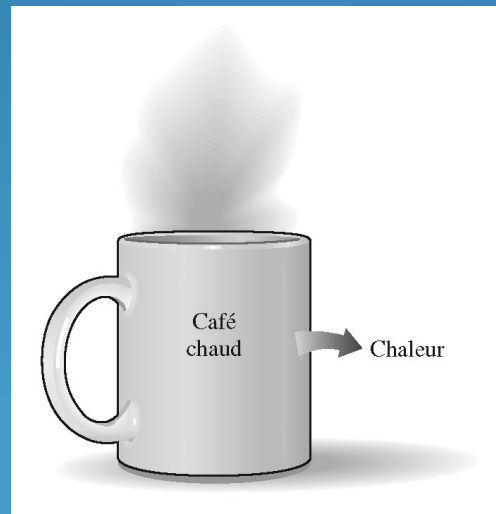
# Chapitre 6 : La deuxième loi de la thermodynamique

Enseignant : Slimane Benneceur  
Courriel: [slimane.benneceur@polymtl.ca](mailto:slimane.benneceur@polymtl.ca)

# Chapitre 6 : La deuxième loi de la thermodynamique



# À quoi sert le deuxième principe de la thermodynamique ?



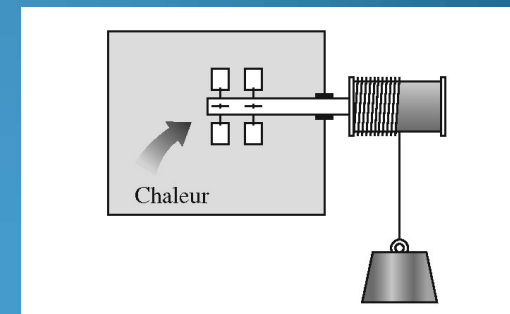
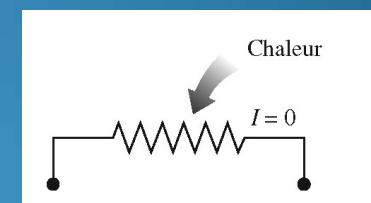
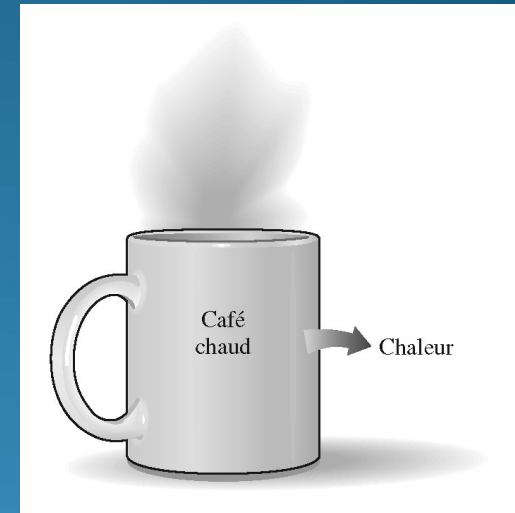
## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

### Objectifs :

- Présenter la 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique et l'appliquer dans l'étude des cycles
- Montrer qu'une évolution ne peut se produire à moins de satisfaire simultanément la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique
- Définir les notions de réservoir thermique, évolution réversible et irréversible, machine thermique, réfrigérateur et thermopompe
- Présenter les énoncés de Kelvin-Planck et de Clausius
- Décrire le cycle de Carnot et l'appliquer aux machines ainsi qu'aux réfrigérateurs et aux thermopompes
- Déterminer les rendements de systèmes réversibles

## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

- La 1<sup>ère</sup> loi porte sur le principe de conservation de l'énergie. L'énergie est donc quantifiable.
- Ce principe n'impose toutefois aucune restriction quant au sens dans lequel la chaleur est transmise ou le travail effectué.
- Est-il possible de convertir entièrement du travail en chaleur?
- L'inverse est-il possible?



## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

**La 2<sup>e</sup> loi permet de prédire le sens d'une évolution et permet d'attribuer à l'énergie la notion de *qualité***

**La 2<sup>e</sup> loi permet de quantifier la dégradation de la qualité de l'énergie dans les évolutions**

**La 2<sup>e</sup> loi permet également de définir les limites théoriques du rendement de diverses machines**

# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

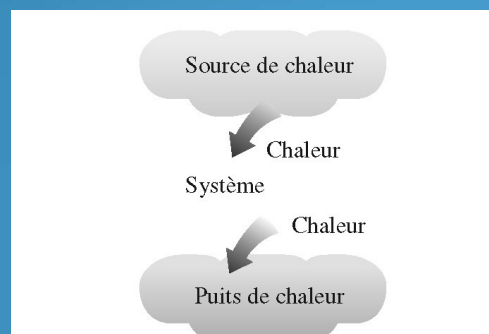
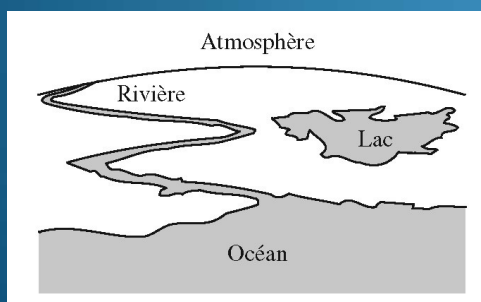
## Les réservoirs thermiques

*Un réservoir thermique est un corps qui peut recevoir ou céder de la chaleur indéfiniment sans que sa température en soit modifiée*

*En application, les réservoirs thermiques sont déterminés en fonction de la nature du problème à analyser*

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

*Un puits de chaleur : est un réservoir thermique qui absorbe de la chaleur dégagée par un système*



$T_H$  = Température de la source

$Q_H$  = Quantité de chaleur provenant de la source

$T_L$  = Température du puits

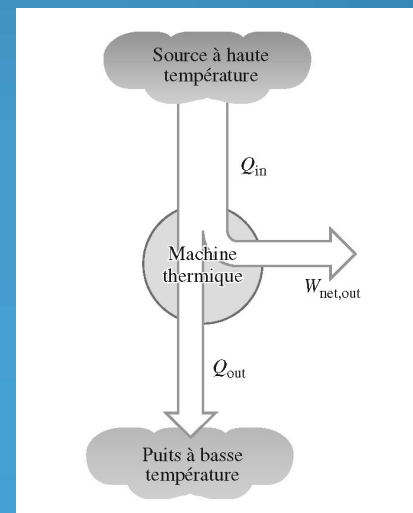
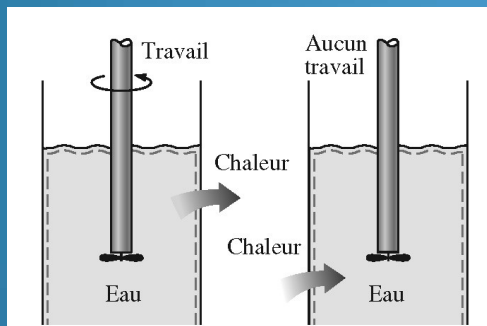
$Q_L$  = Quantité de chaleur rejetée vers la source

# Les Machines Thermiques

*L'utilité des machines thermiques est de convertir l'énergie reçue sous forme de chaleur en travail*

*Les particularités communes à toutes les machines thermiques sont :*

- *Elles reçoivent de la chaleur d'une source à haute température*
- *Elles convertissent une fraction de la chaleur en travail*
- *Elle rejette le reste de la chaleur dans un puits à basse température*
- *Elles décrivent un cycle*

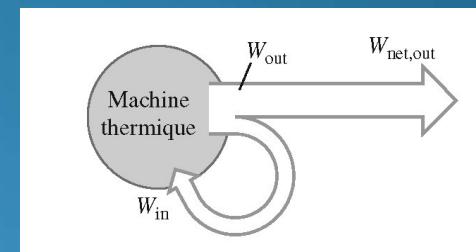
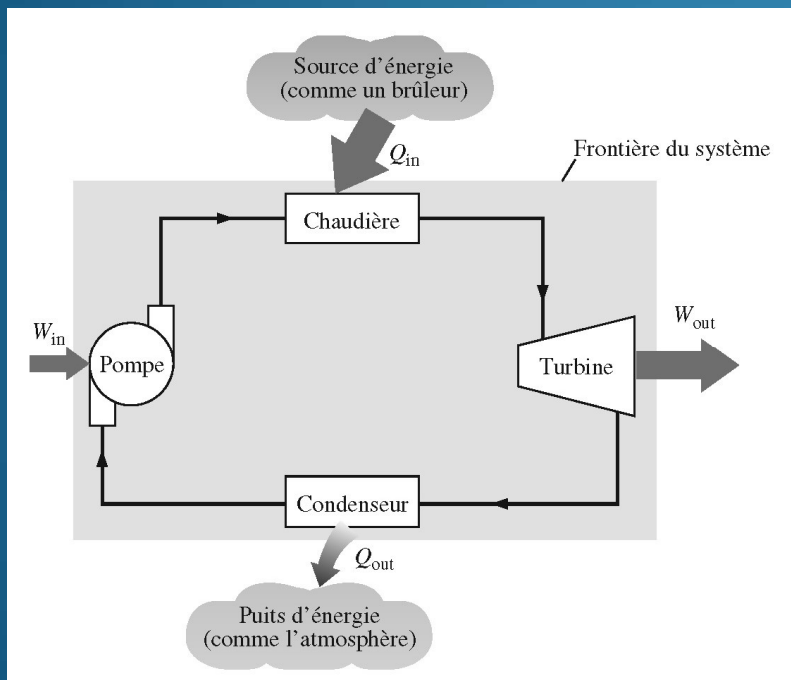




## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

# Les Machines Thermiques

## *La centrale thermique*



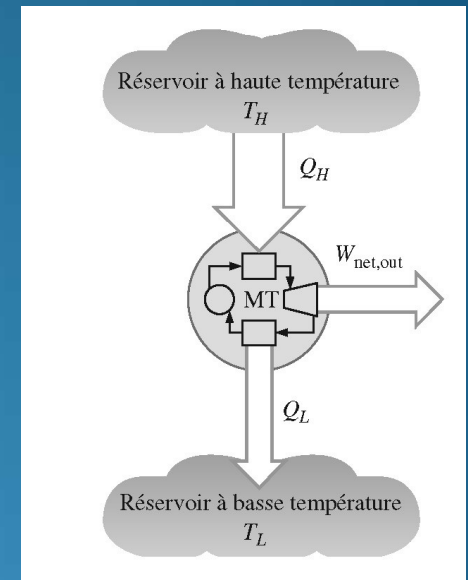
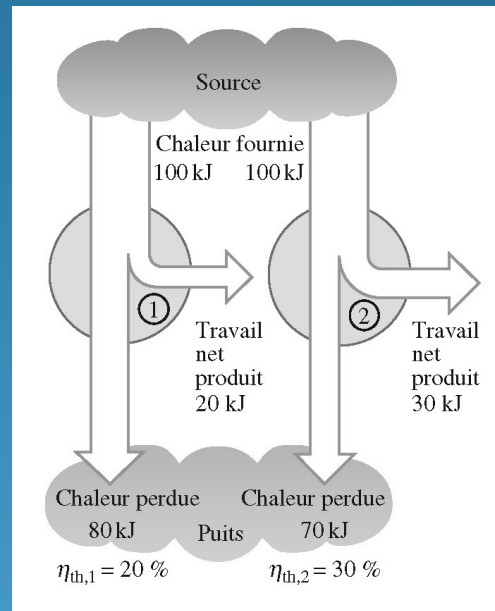
# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

## Le rendement thermique

*La fraction de chaleur convertie en travail est une mesure du rendement de la machine*

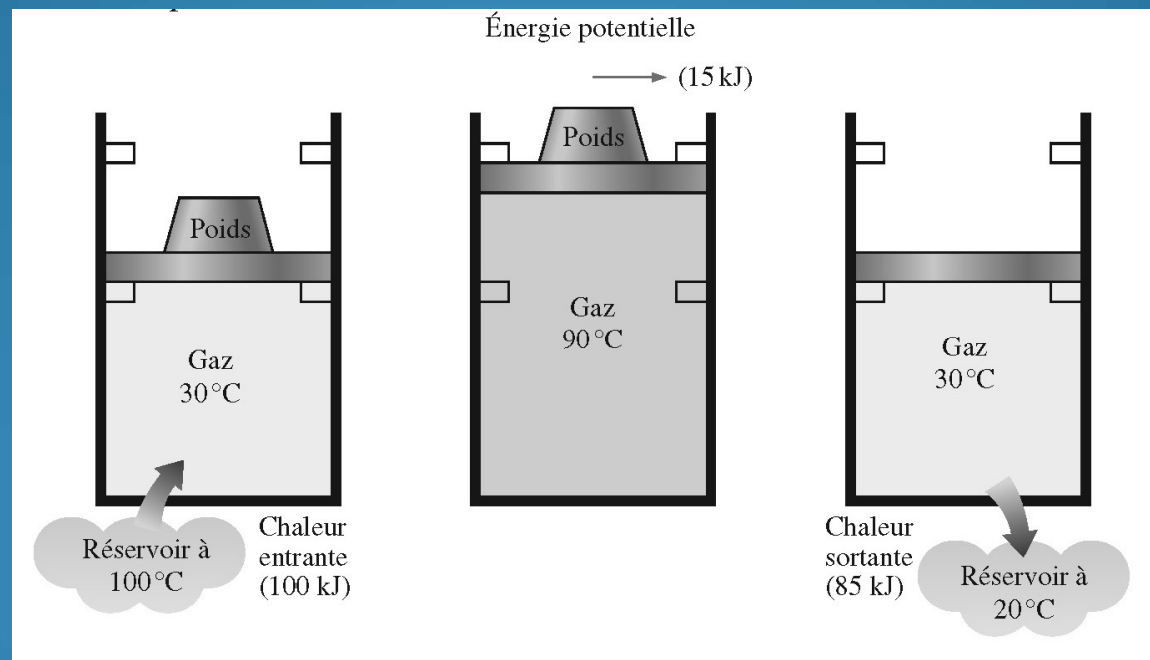
$$\eta_{th} = \frac{\text{Énergie recherchée}}{\text{Énergie fournie}}$$

$$\eta_{th} = \frac{\text{Travail net produit}}{\text{Chaleur ajoutée}}$$



## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

### Peut-on récupérer $Q_{out}$ ?

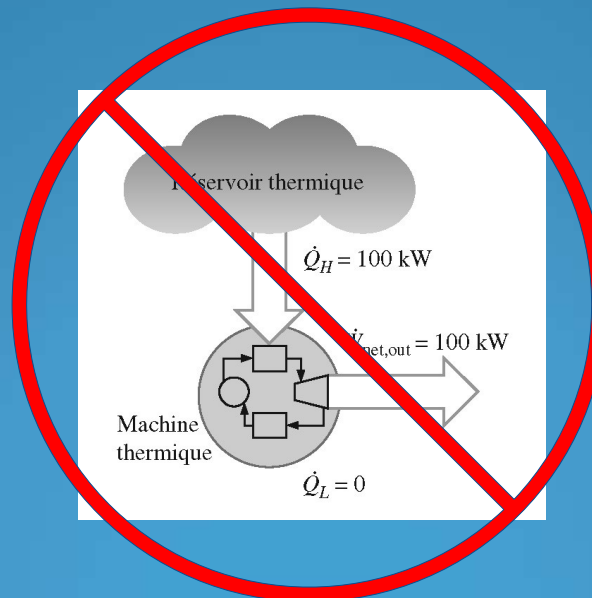


## Énoncé de Kelvin-Planck

La deuxième loi de la thermodynamique

**Il est impossible de concevoir une machine décrivant un cycle et qui n'aurait d'autre effet que de produire du travail et d'échanger de la chaleur avec un seul réservoir thermique**

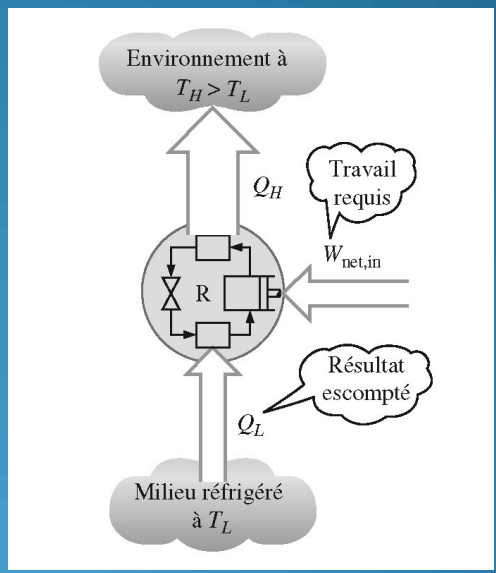
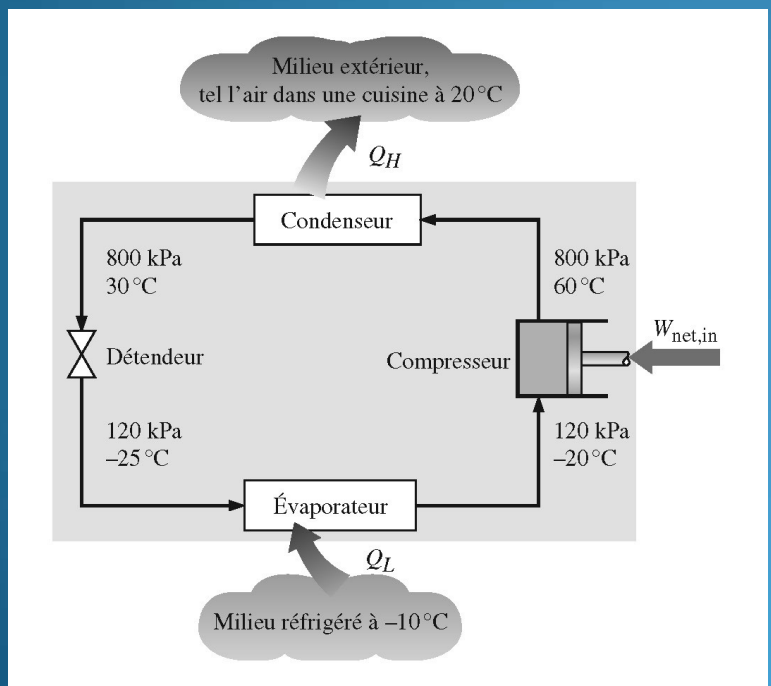
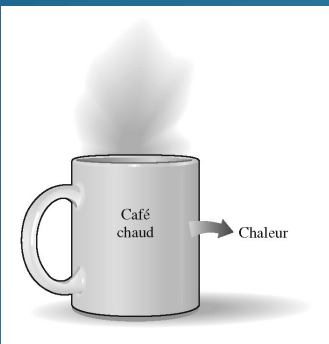
**Ainsi, il est impossible de concevoir une machine thermique dont le rendement est de 100%**



# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

## Les Réfrigérateurs et les Thermopompes

*Transmettre de la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à haute température ne peut se faire qu'au moyen d'une machine appelée réfrigérateur*



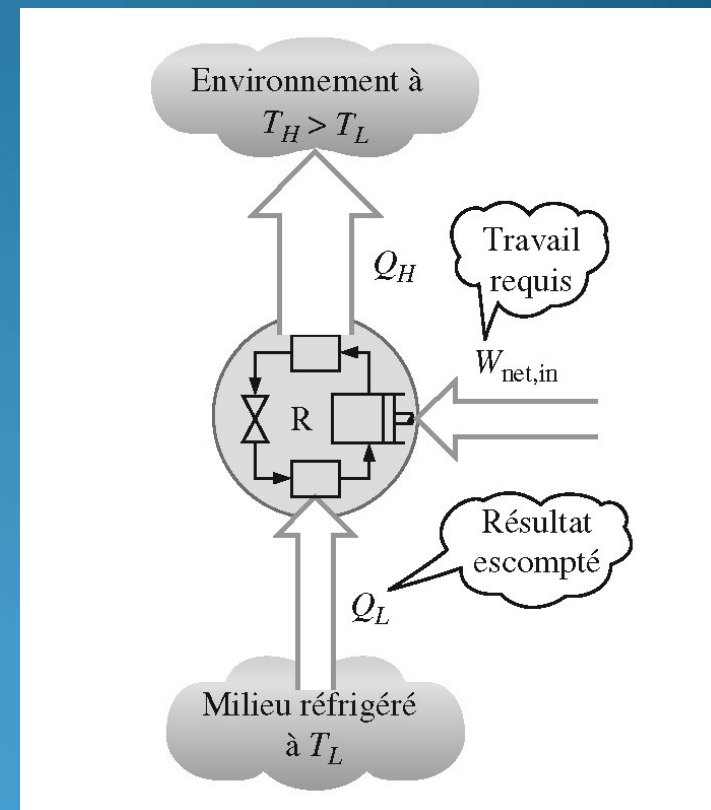
# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

## Les Réfrigérateurs

### Coefficient de performance COP

$$COP = \frac{\text{Énergie recherchée}}{\text{Énergie fournie}}$$

$$COP_R = \frac{\text{Chaleur extraite}}{\text{Travail requis}}$$



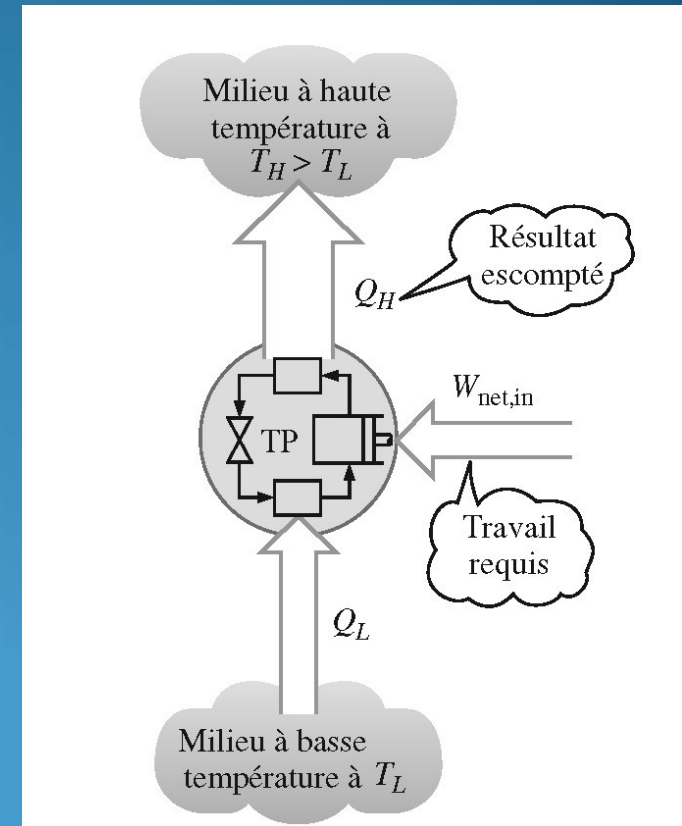
## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

### Les Thermopompes

Coefficient de performance COP

$$COP = \frac{\text{Énergie recherchée}}{\text{Énergie fournie}}$$

$$COP_{TP} = \frac{\text{Chaleur rejetée}}{\text{Travail requis}}$$



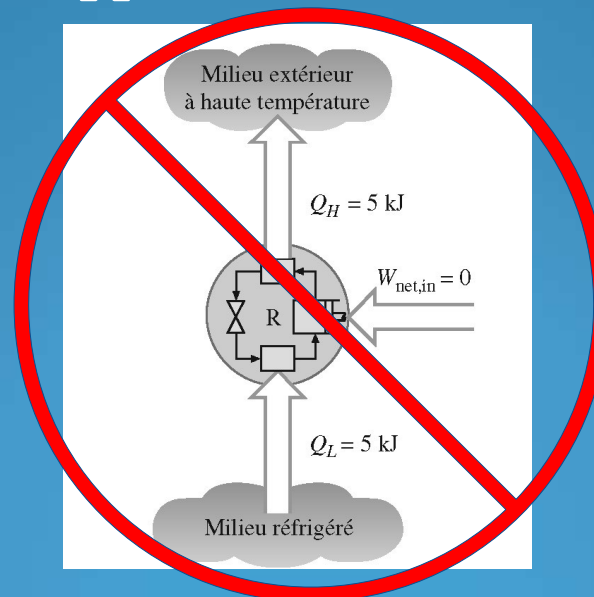
# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

## Énoncé de Clausius

La deuxième loi de la thermodynamique

Il est impossible de concevoir une machine décrivant un cycle et qui n'aurait d'autre effet que de transmettre de la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à haute température

Ainsi, il est impossible de concevoir un réfrigérateur ne nécessitant aucun apport de travail externe



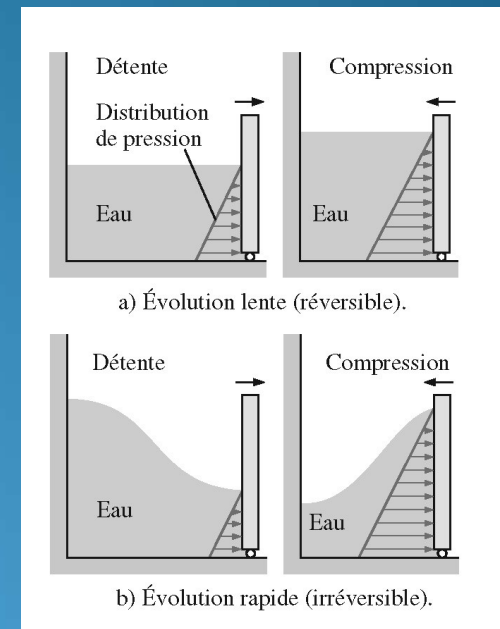


## L'Évolution Réversible et l'Évolution irréversible

Selon la 2<sup>e</sup> loi, il est impossible de concevoir un machine thermique dont le rendement est de 100%, quel est alors le rendement maximal possible?

**Une évolution IRRÉVERSIBLE ne peut être inversée sans ne laisser de traces sur le milieu extérieur.**

**Une évolution RÉVERSIBLE est une évolution qui, après avoir été décrite, peut être inversée de manière à ne laisser subsister aucune modification du système ou du milieu.**



# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

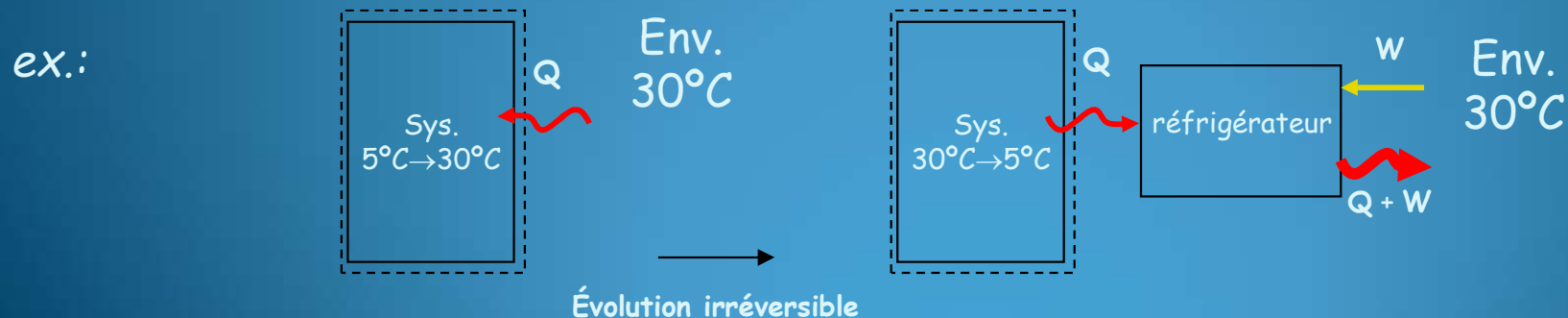
## 3) Évolutions réversibles et irréversibles

### 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

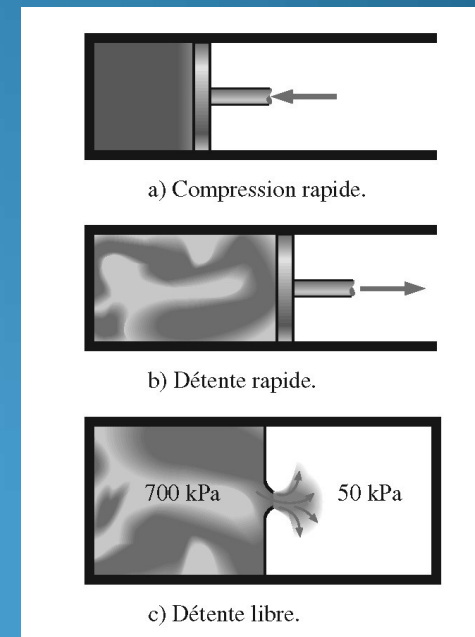
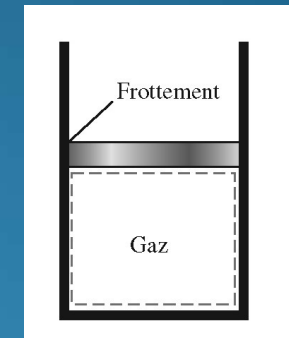
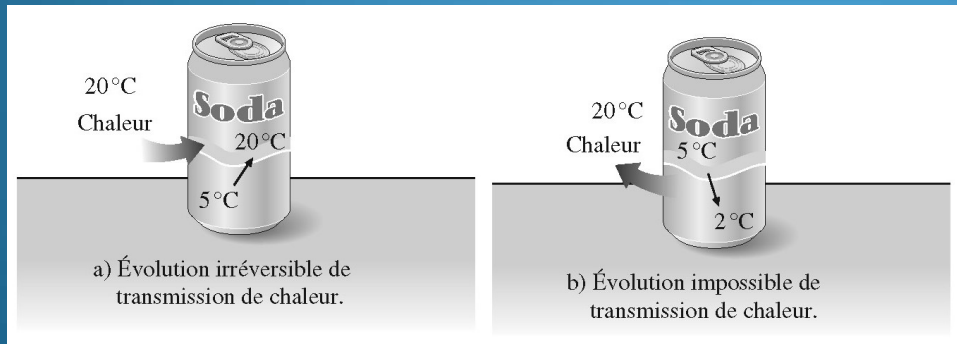
Une évolution qui n'est pas réversible, c'est-à-dire qui laisserait des traces sur l'environnement si le système est ramené à son état initial



## Les Irréversibilités

Bon nombre de facteurs rendent les évolutions irréversibles

- Frottement
- Détente libre d'un gaz
- Compression et détente rapide
- Transmission de chaleur due à une différence de température
- Mélange de deux substances
- Réaction chimique
- ...



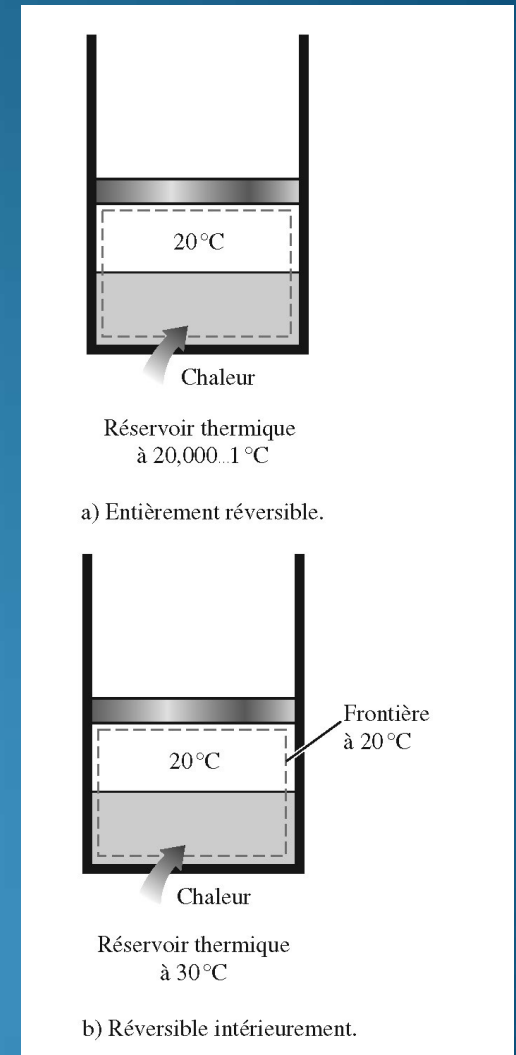
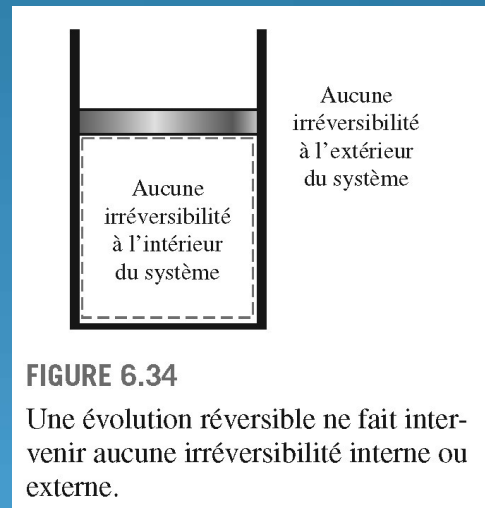
## Les Évolutions réversibles intérieurement et extérieurement

**Une évolution est dite réversible intérieurement si aucune irréversibilité ne se produit à l'intérieur des frontières du système durant l'évolution**

**(Évolution quasi-statique = Évolution réversible intérieurement)**

**Une évolution est dite réversible extérieurement si aucune irréversibilité ne se produit à l'extérieur des frontières du système durant l'évolution**

**Une évolution est dite réversible ou entièrement réversible si aucune irréversibilité ne se produit dans le système et le milieu extérieur.**



### Le cycle de Carnot

**On maximise le rendement du cycle d'une machine thermique en recourant, d'une part, aux évolutions qui requièrent le minimum de travail et, d'autre part, aux évolutions qui en produisent le maximum**

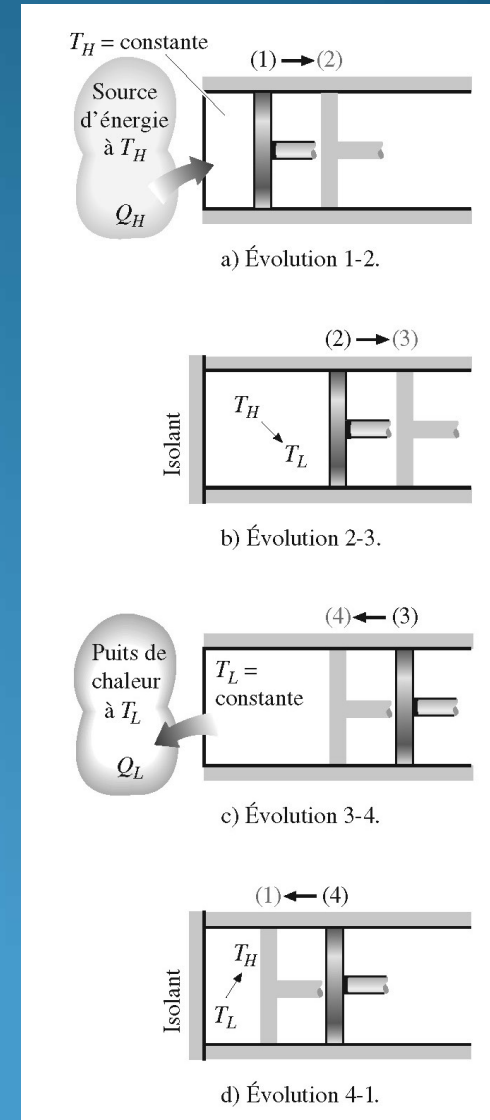
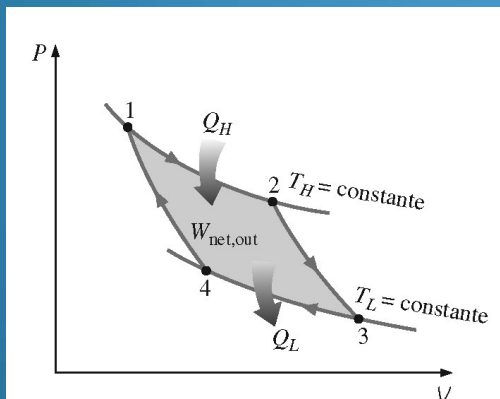
**Les cycles réversibles sont les cycles dont le rendement est maximal**

**Le cycle de Carnot est le cycle le plus efficace qui puisse fonctionner entre deux réservoirs thermiques**

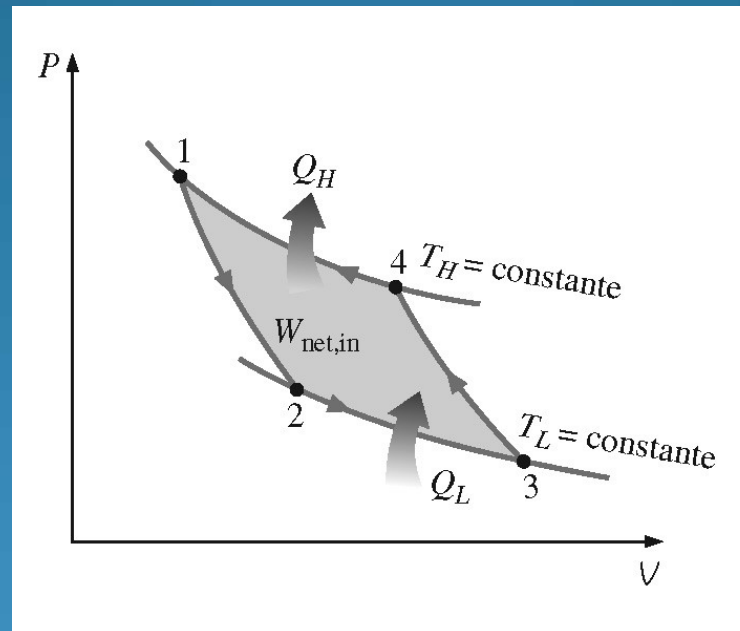
**La machine thermique qui décrit le cycle de Carnot est appelé :  
Machine de Carnot**

## Le cycle de Carnot

- Détente isotherme de 1 à 2 (apport de chaleur  $Q_H$ )
- Détente adiabatique de 2 à 3
- Compression isotherme de 3 à 4 (rejet de chaleur  $Q_L$ )
- Compression adiabatique de 4 à 1



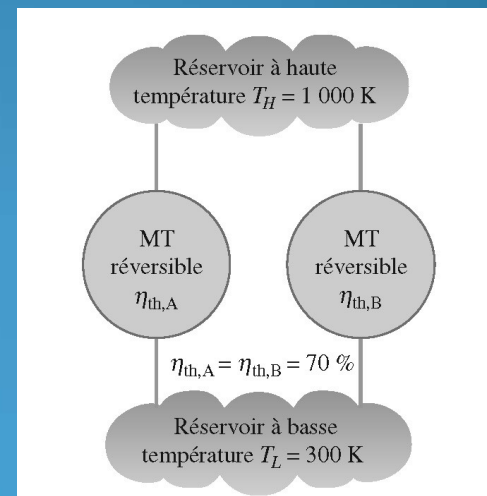
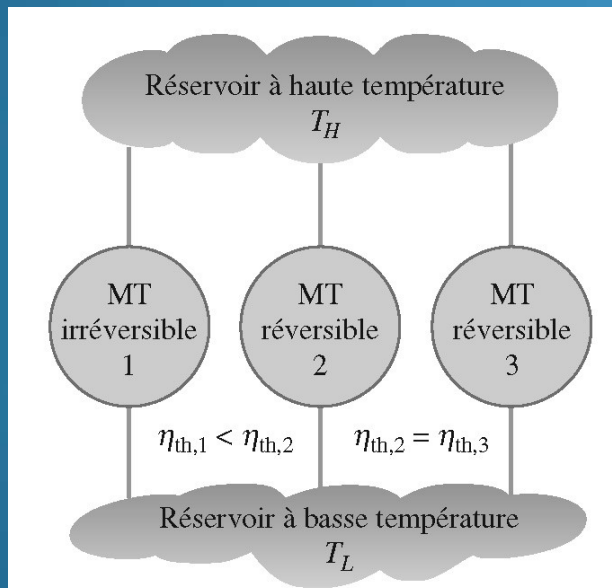
## Le cycle de Carnot inversé Cycle de Carnot de réfrigération



## Les Principes de Carnot

**Il est impossible de réaliser une machine qui fonctionnerait entre deux réservoirs thermiques ( $T_H$  et  $T_L$ ) donnés et qui serait plus efficace qu'une machine fonctionnant entre ces deux mêmes réservoirs.**

**Toutes les machines thermiques qui décrivent un cycle de Carnot entre deux réservoirs thermiques donnés ( $T_H$  et  $T_L$ ) ont le même rendement.**





### L'Échelle de température thermodynamique

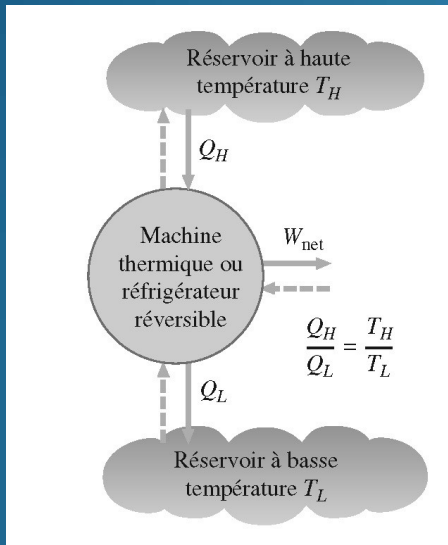
**Le 2<sup>e</sup> principe de Carnot stipule que toutes les machines qui décrivent un cycle de Carnot entre deux réservoirs thermiques donnés ont le même rendement.**

**Le rendement de ces machines est donc indépendants du fluide moteur, de la façon dont le cycle est décrit et du type de machine.**

**Le rendement ne dépend que de la température des réservoirs thermiques.**

**C'est sur cette propriété que s'appuie l'échelle de température thermodynamique qui est une échelle de température indépendante de toute substance.**

## L'Échelle de température thermodynamique

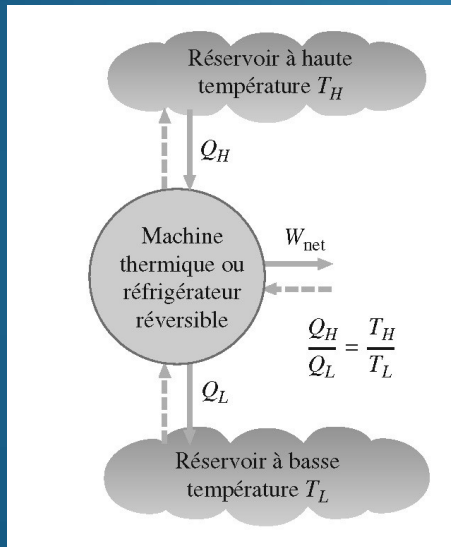


$$\left( \frac{Q_H}{Q_L} \right)_{rév} = \frac{T_H}{T_L}$$

# Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

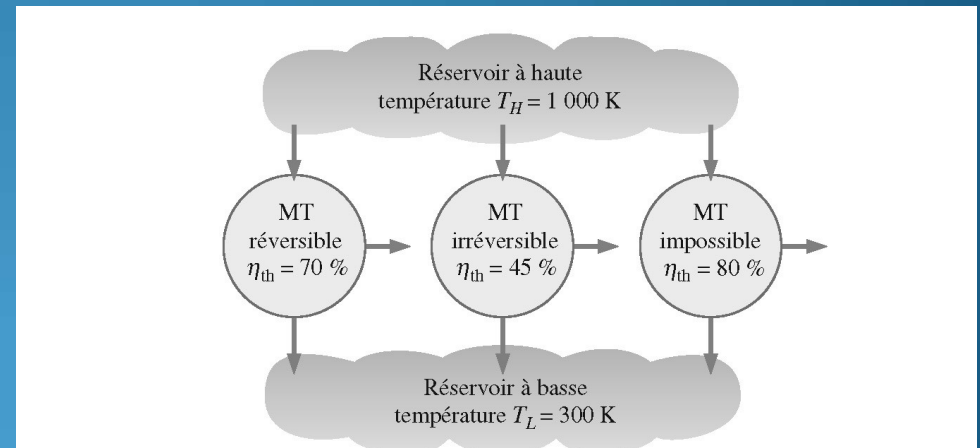
## La machine de Carnot

*Le rendement de Carnot est la limite supérieure qu'aucune machine réelle ne pourra jamais atteindre*



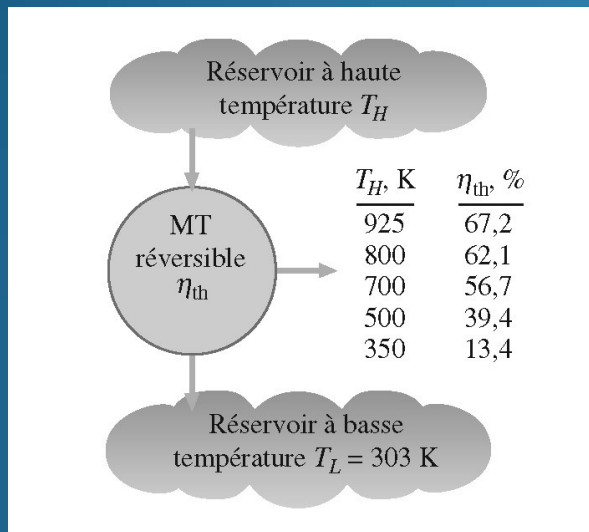
$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

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

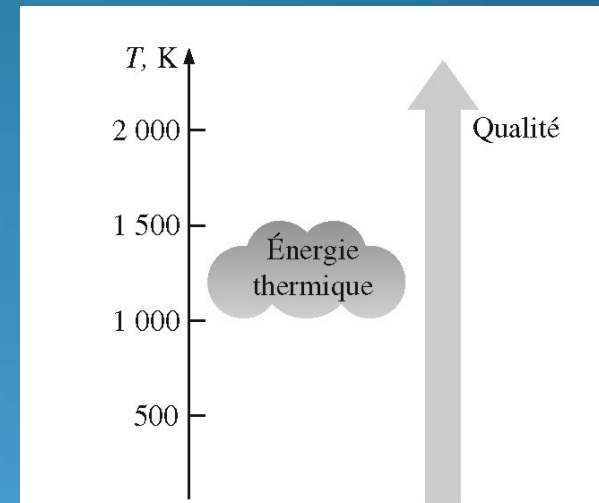


## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

### La qualité de l'énergie



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



## Chapitre 6 : La 2<sup>e</sup> loi de la thermodynamique

### Le réfrigérateur et la thermopompe de Carnot

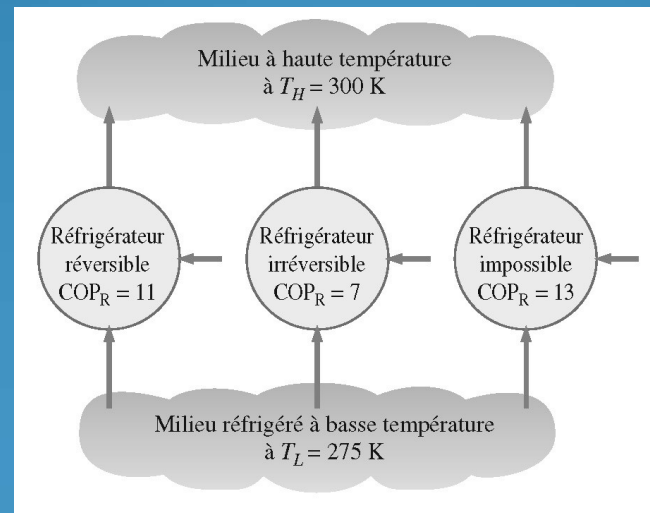
*Ces machines fonctionnent selon le cycle inversé de Carnot*

$$COP_R = \frac{1}{Q_H / Q_L - 1}$$

$$COP_{TP} = \frac{1}{1 - Q_L / Q_H}$$

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

$$COP_{TP,rév} = \frac{1}{1 - T_L / T_H}$$



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)**

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

## 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)**

- 0.83kW
- 110kJ/min

## Exercices 6.39 (Solution)

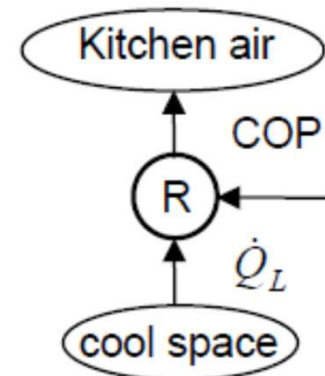
**Assumptions** The refrigerator operates steadily.

**Analysis (a)** Using the definition of the coefficient of performance, the power input to the refrigerator is determined to be

$$\dot{W}_{\text{net,in}} = \frac{\dot{Q}_L}{\text{COP}_R} = \frac{60 \text{ kJ/min}}{1.2} = 50 \text{ kJ/min} = \mathbf{0.83 \text{ kW}}$$

**(b)** The heat transfer rate to the kitchen air is determined from the energy balance,

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{net,in}} = 60 + 50 = \mathbf{110 \text{ kJ/min}}$$





## 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.

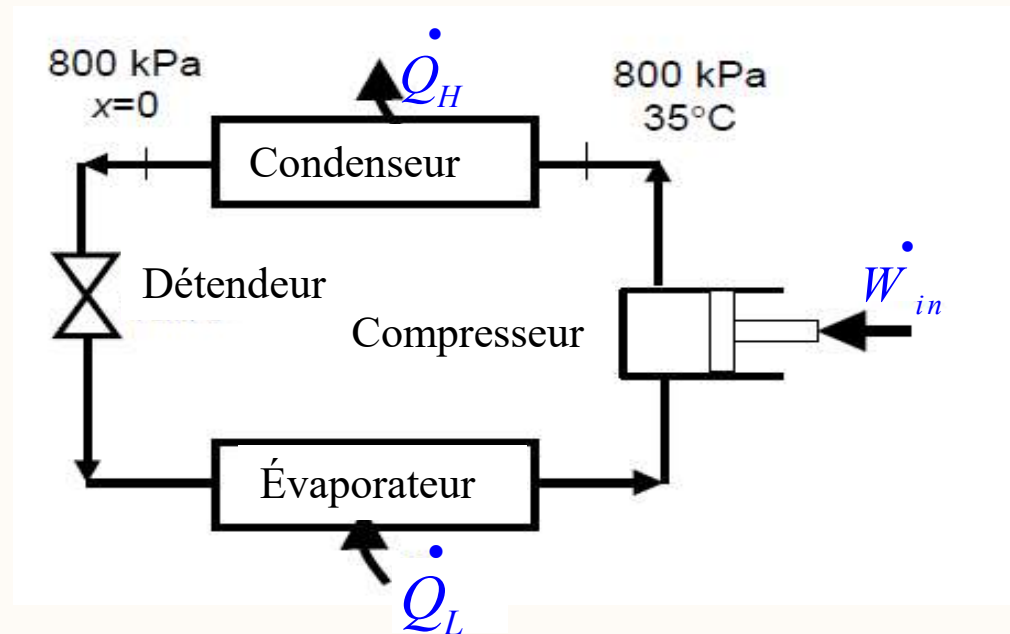
Déterminez :

- 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 (Solution)

**Assumptions** 1 The heat pump operates steadily.  
2 The kinetic and potential energy changes are zero.

**Properties** The enthalpies of R-134a at the condenser inlet and exit are

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 800 \text{ kPa} \\ T_1 = 35^\circ\text{C} \end{array} \right\} h_1 = 271.22 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 800 \text{ kPa} \\ x_2 = 0 \end{array} \right\} h_2 = 95.47 \text{ kJ/kg}$$

**Analysis** (a) An energy balance on the condenser gives the heat rejected in the condenser

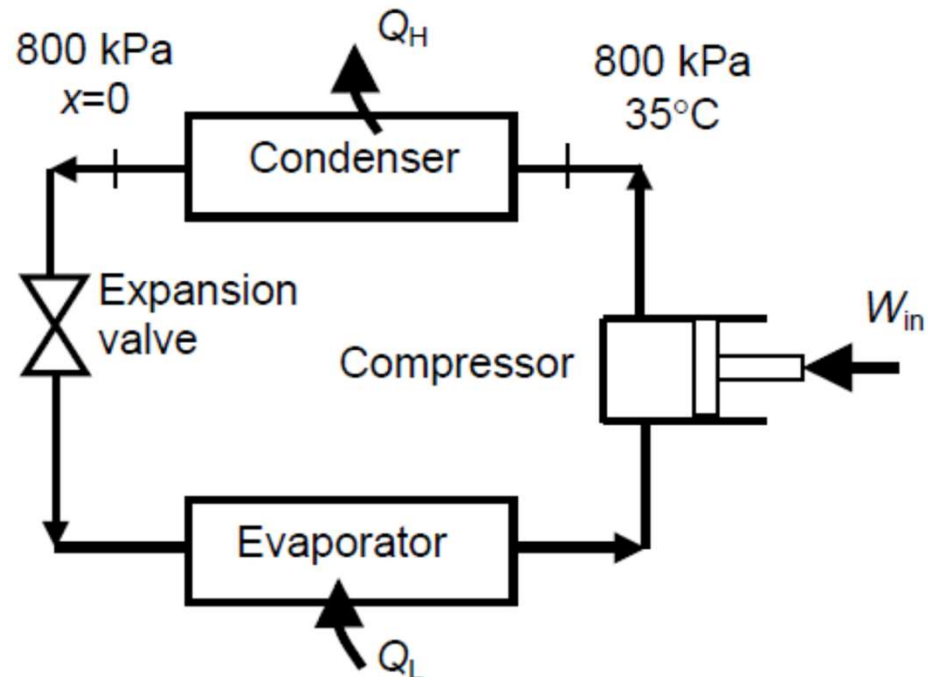
$$\dot{Q}_H = \dot{m}(h_1 - h_2) = (0.018 \text{ kg/s})(271.22 - 95.47) \text{ kJ/kg} = 3.164 \text{ kW}$$

The COP of the heat pump is

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{\text{in}}} = \frac{3.164 \text{ kW}}{1.2 \text{ kW}} = \mathbf{2.64}$$

(b) The rate of heat absorbed from the outside air

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{\text{in}} = 3.164 - 1.2 = \mathbf{1.96 \text{ kW}}$$



## 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 :

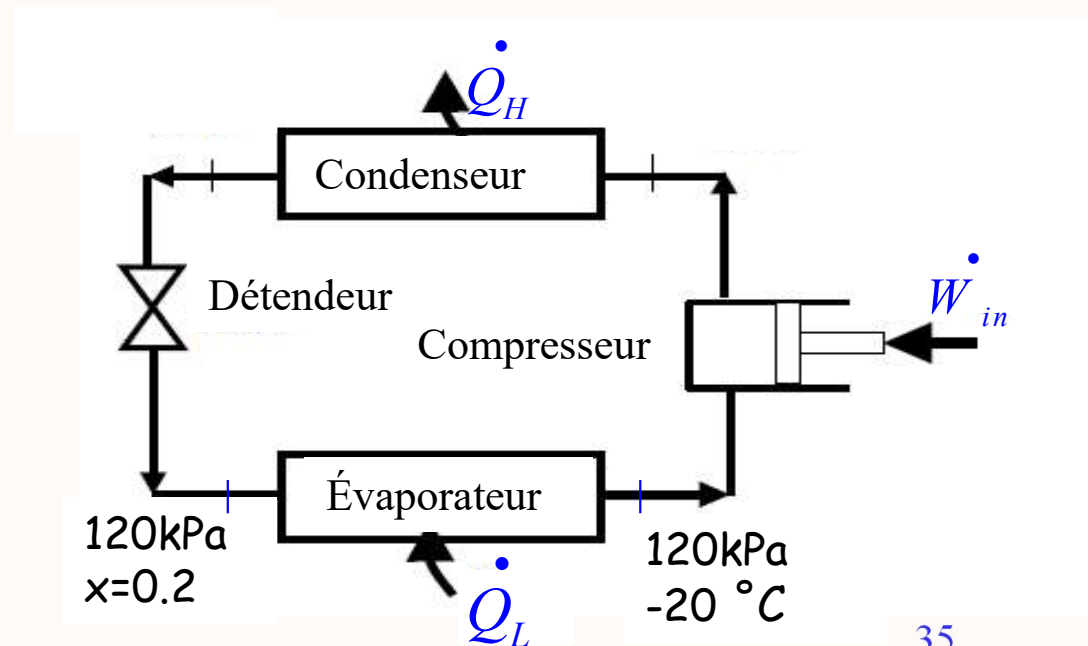
- Le débit massique du fluide frigorigène
- Le taux auquel la chaleur est rejetée dans la cuisine .

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

### Solution (en classe)

a) 0.0031kg/s

b) 0.99kW



## Exercices 6.49 (Solution)

**Assumptions** 1 The refrigerator operates steadily. 2 The kinetic and potential energy changes are zero.

**Properties** The properties of R-134a at the evaporator inlet and exit states are (Tables A-11 through A-13)

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 120 \text{ kPa} \\ x_1 = 0.2 \end{array} \right\} h_1 = 65.38 \text{ kJ/kg}$$

$$\left. \begin{array}{l} P_2 = 120 \text{ kPa} \\ T_2 = -20^\circ\text{C} \end{array} \right\} h_2 = 238.84 \text{ kJ/kg}$$

**Analysis** (a) The refrigeration load is

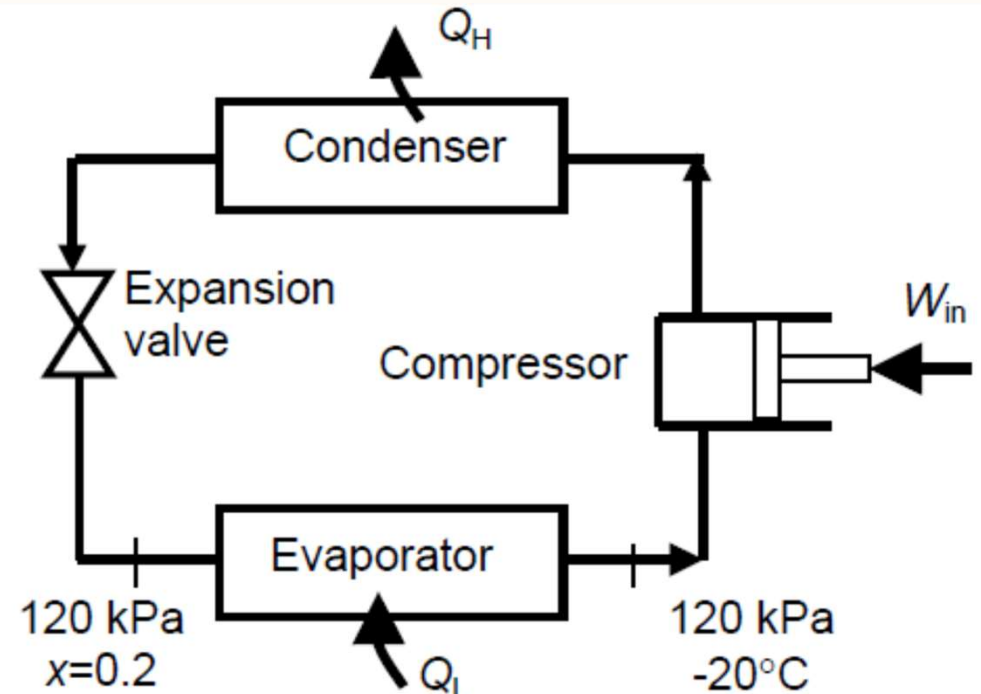
$$\dot{Q}_L = (\text{COP})\dot{W}_{\text{in}} = (1.2)(0.45 \text{ kW}) = 0.54 \text{ kW}$$

The mass flow rate of the refrigerant is determined from

$$\dot{m}_R = \frac{\dot{Q}_L}{h_2 - h_1} = \frac{0.54 \text{ kW}}{(238.84 - 65.38) \text{ kJ/kg}} = \mathbf{0.0031 \text{ kg/s}}$$

(b) The rate of heat rejected from the refrigerator is

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{\text{in}} = 0.54 + 0.45 = \mathbf{0.99 \text{ kW}}$$



## 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.