

MEC1210 - Heures 18 à 21

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

heures 18,19



- *Introduction*
- *Énoncés du second principe*
- *Évolutions réversibles et irréversibles*
- *Le Cycle de Carnot*
- *Corollaires du second principe*
- *L'échelle de température Kelvin*

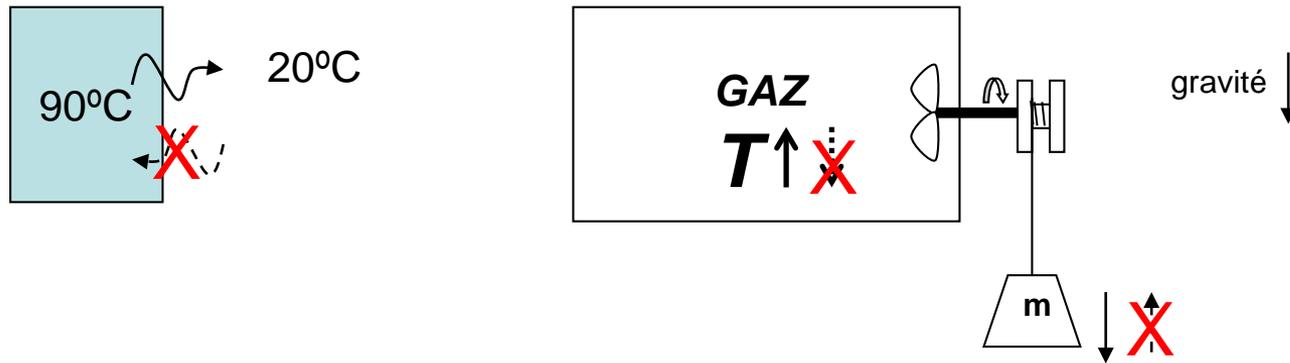
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs

VI) Second principe de la thermodynamique

1) Introduction

a) Insuffisance du premier principe de la thermodynamique

Les évolutions vont souvent dans une seule direction



Premier principe de la thermo. permet les deux directions

Mais la réalité non! → second principe de la thermodynamique

Une évolution doit satisfaire le premier ET le second principe pour se réaliser

Principales utilités du second principe:

- i) Indique la direction d'une évolution
- ii) quantifie la performance idéale d'un cycle ou d'une machine quelconque
- iii) définit une échelle de température indépendante des propriétés de la matière

Note: le deuxième principe est basé sur des observations, mais n'a jamais été contredit par des expériences

b) Définitions

i) réservoir thermique

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

Exemples de corps qui peuvent être approximatés comme réservoirs thermiques:

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

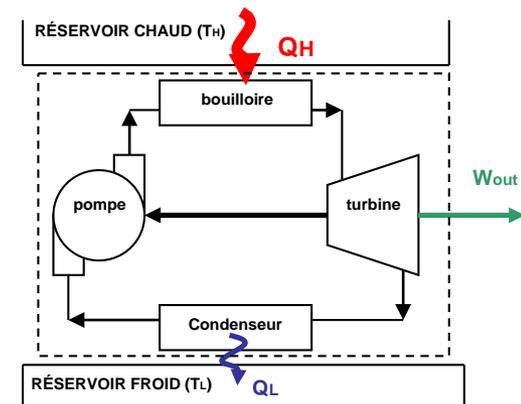
ii) moteur thermique

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

ex.: centrale thermique (cycle Rankine)

Caractéristiques:

- cycle
- absorbe la chaleur d'un réservoir de haute T , produit un travail net, et rejette de la chaleur restante à un réservoir de basse T .

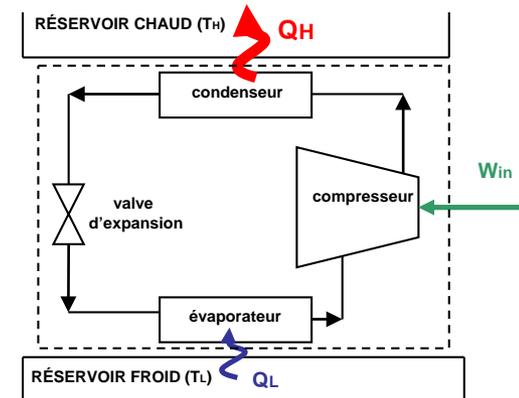


$$\text{rendement thermique } (\eta_{\text{th}}) = \frac{\text{output désiré}}{\text{input}} = \frac{W_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{H}} - Q_{\text{L}}}{Q_{\text{H}}} = 1 - \frac{Q_{\text{L}}}{Q_{\text{H}}}$$

iii) 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 (fonctionnement inverse d'un moteur thermique).

- réfrigérateur: garde TL constant
- pompe thermique: garde TH constant



coefficient de performance:

$$\text{réfrigérateur: } \text{COP}_{\text{R}} = \frac{\text{output désiré}}{\text{input}} = \frac{Q_{\text{L}}}{W_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{L}}}{Q_{\text{H}} - Q_{\text{L}}} = \frac{1}{Q_{\text{H}}/Q_{\text{L}} - 1}$$

$$\text{pompe thermique: } \text{COP}_{\text{PT}} = \frac{\text{output désiré}}{\text{input}} = \frac{Q_{\text{H}}}{W_{\text{in}}} = \frac{Q_{\text{H}}}{Q_{\text{H}} - Q_{\text{L}}} = \frac{1}{1 - Q_{\text{L}}/Q_{\text{H}}}$$

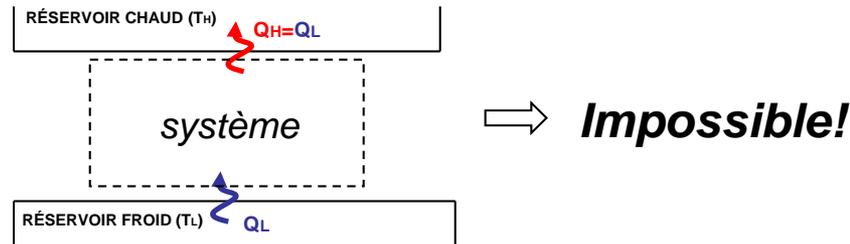
Note: $\text{COP}_{\text{PT}} - \text{COP}_{\text{R}} = 1$

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

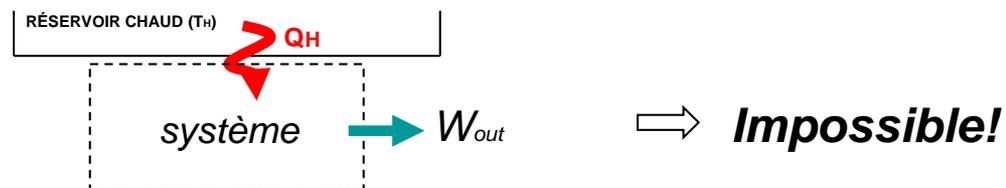
Aucun système ne peut uniquement (c'est-à-dire sans apport de l'environnement) transmettre de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud



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

b) Énoncé de Kelvin-Planck

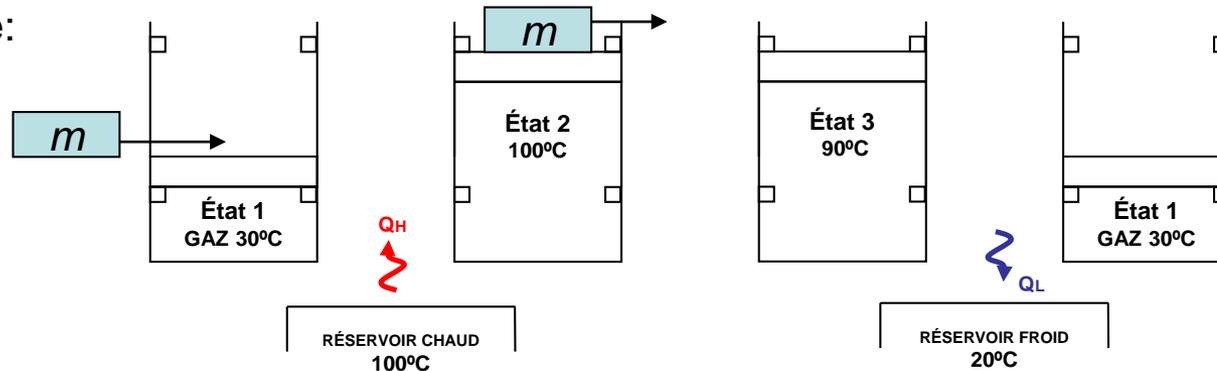
Aucun système ne peut accomplir un cycle et effectuer un travail net sur l'environnement en recevant de la chaleur d'un seul réservoir



b) Énoncé de Kelvin-Planck (cont.)

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

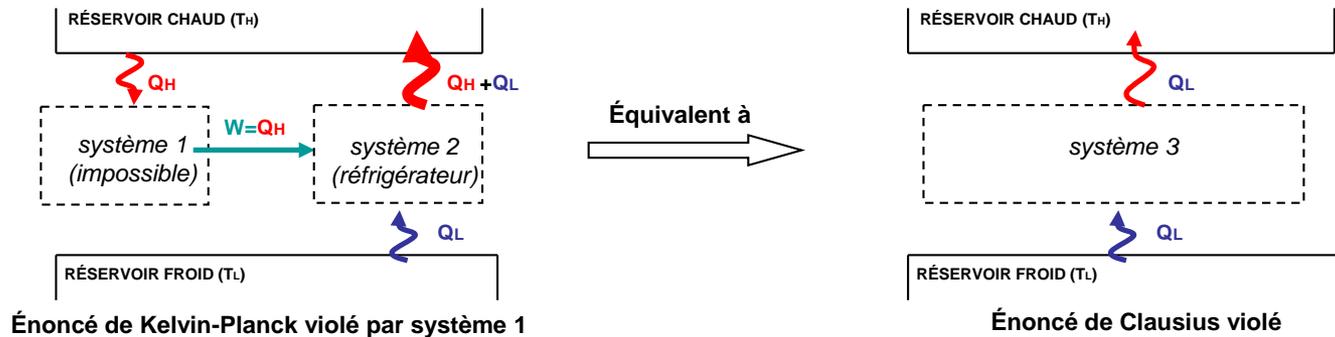
exemple:



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 T

c) Équivalence des deux énoncés



3) Évolutions réversibles et irréversibles

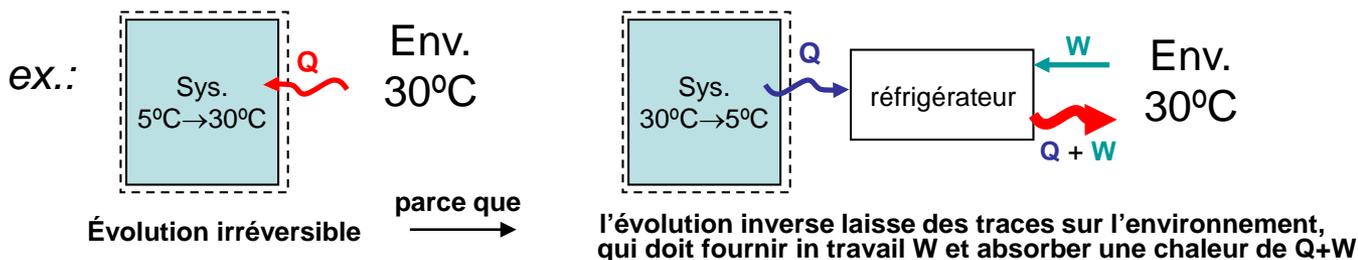
a) Évolution réversible

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

b) Évolution irréversible

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

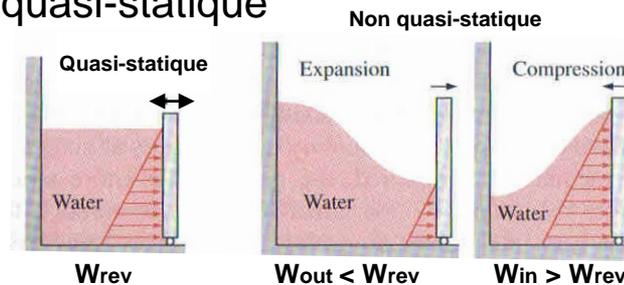


b) Évolution irréversible (cont.)

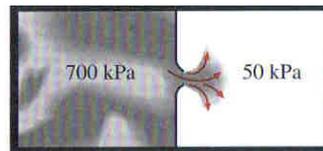
Quelques facteurs d'irréversibilité:

- friction
- transfert de chaleur à travers une différence de température
- mélange de deux ou plusieurs fluides
- résistance électrique
- déformation inélastique
- réaction chimique
- évolution non quasi-statique

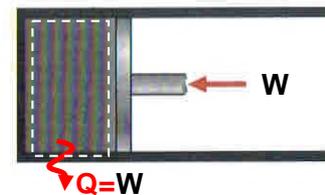
ex. 1:



ex. 2:



Expansion non restreinte
(T reste constante)



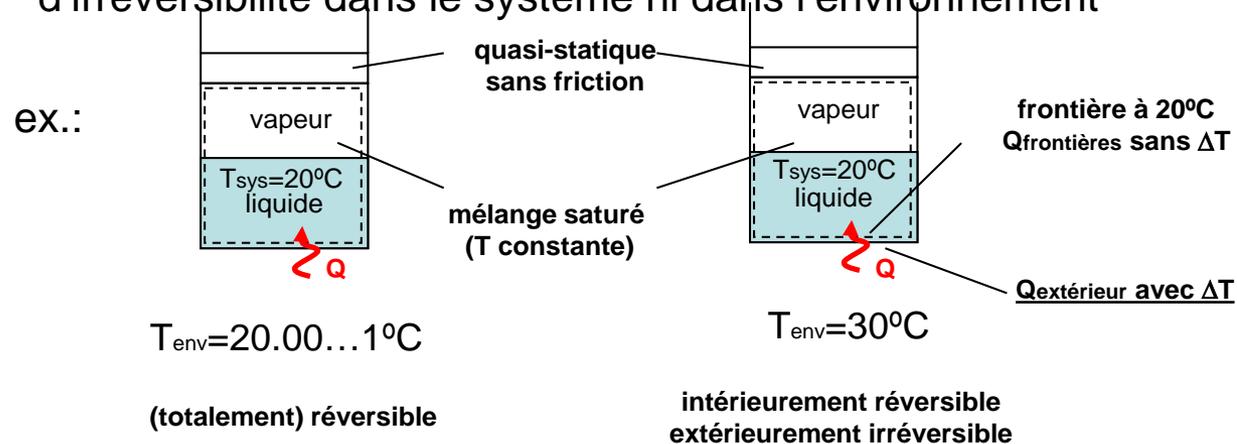
Traces laissées sur l'environnement

Pour revenir, l'environnement doit faire du travail pour comprimer le gaz (T monte) et récupérer cette énergie en chaleur en refroidissant le gaz pour qu'il revienne à T initiale

b) Évolution irréversible (cont.)

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 (totalement) *réversible* s'il y n'y a *aucun* facteur d'irréversibilité dans le système ni dans l'environnement



Exemple: masse glissant avec friction sur une pente

Où on en est?

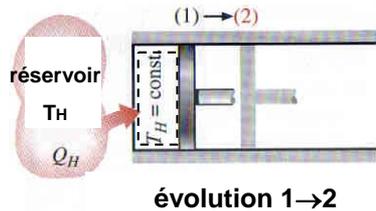
- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)
- VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique**
 - *Introduction*
 - *Énoncés du second principe*
 - *Évolutions réversibles et irréversibles*
 - **Le Cycle de Carnot**
 - **Corollaires du second principe**
 - **L'échelle de température Kelvin**
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs

heures 20, 21

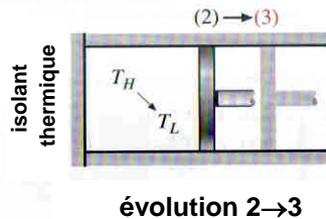


4) Cycle de Carnot

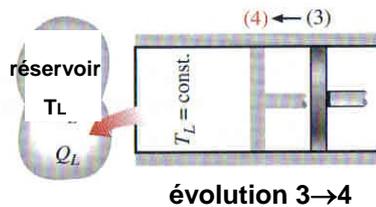
Cycle de production d'énergie composé de quatre évolutions *réversibles* pour décrire un moteur thermique optimal.



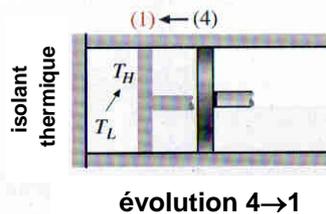
Expansion isothermique quasi-statique.
Transfert de chaleur réversible au système.
Travail fait sur l'environnement



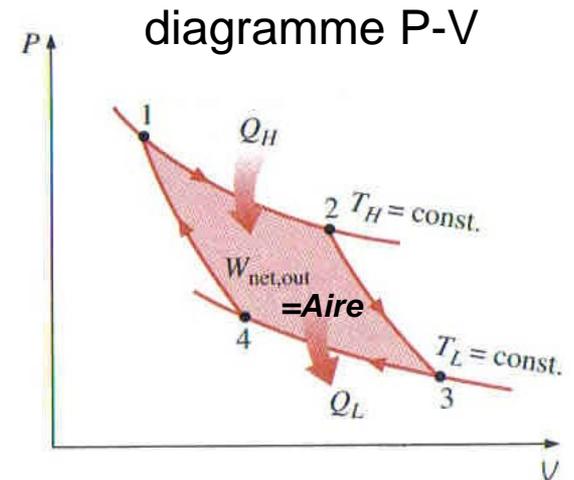
Expansion adiabatique quasi-statique.
Travail fait sur l'environnement.



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

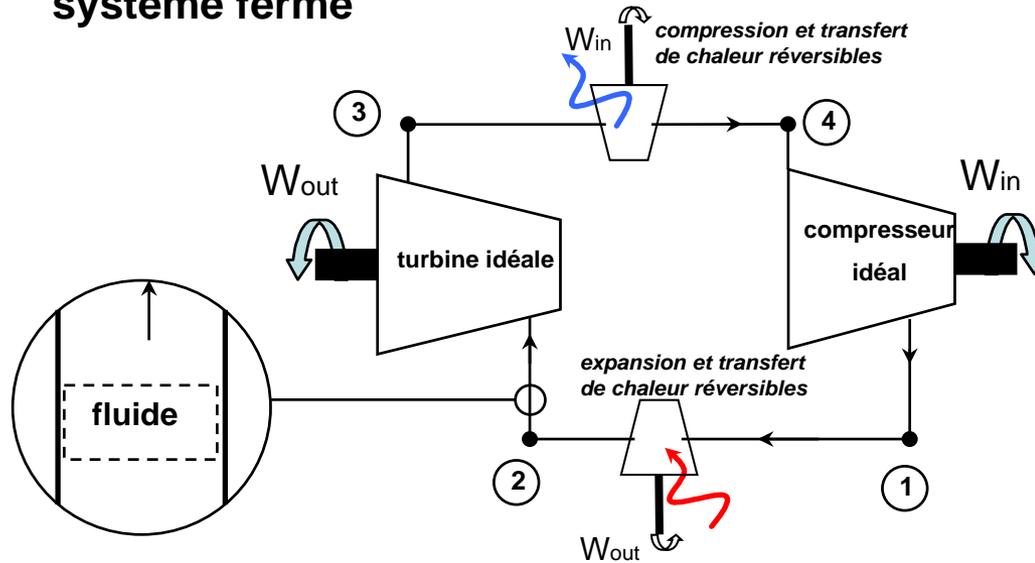


Compression adiabatique quasi-statique.
Travail fait sur système.

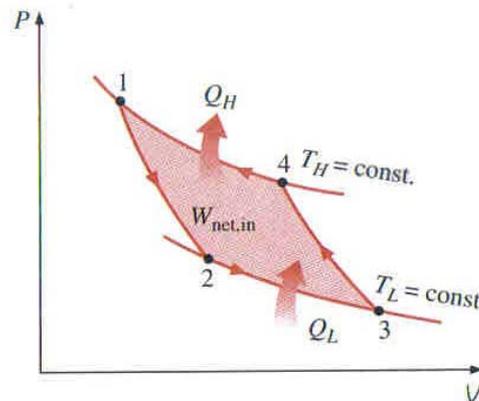


4) Cycle de Carnot (cont.)

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

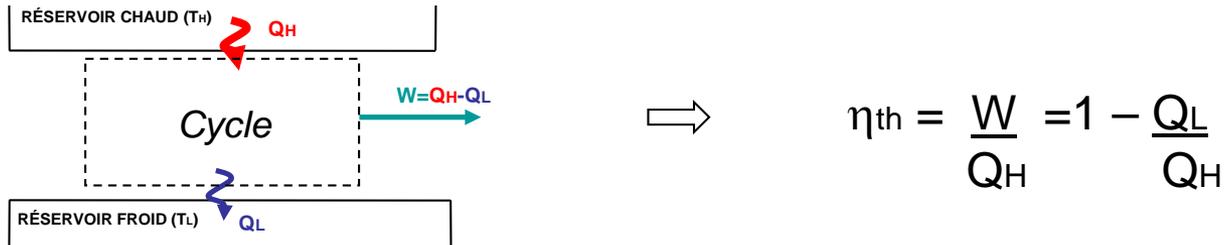


- Le cycle Carnot inversé = cycle de réfrigération optimale



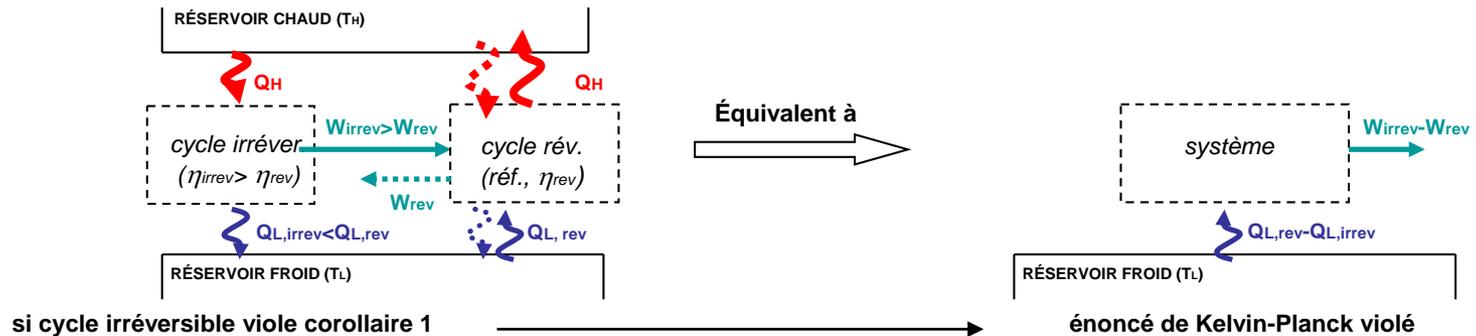
5) Corollaires du second principe

Pour un cycle opérant entre deux réservoirs:



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

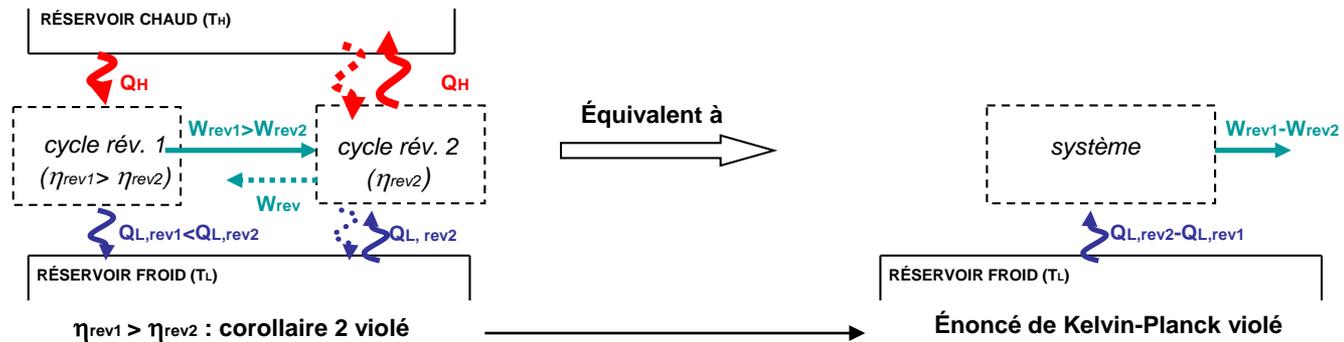
preuve:



5) 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:

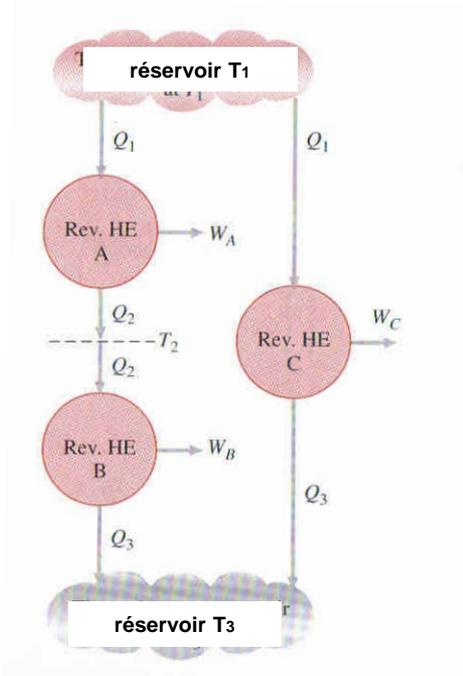
$$\eta_{th,max} = 1 - \left(\frac{Q_L}{Q_H} \right)_{rev}$$

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

$$\frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H)$$



$$\frac{Q_3}{Q_1} = \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_1} = f(T_3, T_1)$$

$f(T_3, T_1) = f(T_3, T_2) \cdot f(T_2, T_1) \longrightarrow$ Seulement possible si:

$$f(T_3, T_1) = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_2)} \cdot \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_1)} \longleftarrow \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_L, T_H) = \frac{\phi(T_L)}{\phi(T_H)}$$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{\phi(T_L)}{\phi(T_H)}$$

Kelvin proposa: $\phi(T) = T$

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

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

réversible

- indépendant de la matière
- zéro à l'infini
- point triple de l'eau à 273.16K

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:

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

Exemples: CBK&L problèmes 6.48 & 6.83 (6.49 & 6.85 dans CB&L, 1^{ère} éd., 6-58 & 6-99 dans C&B, 6^{ème} éd.)