

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 18,19

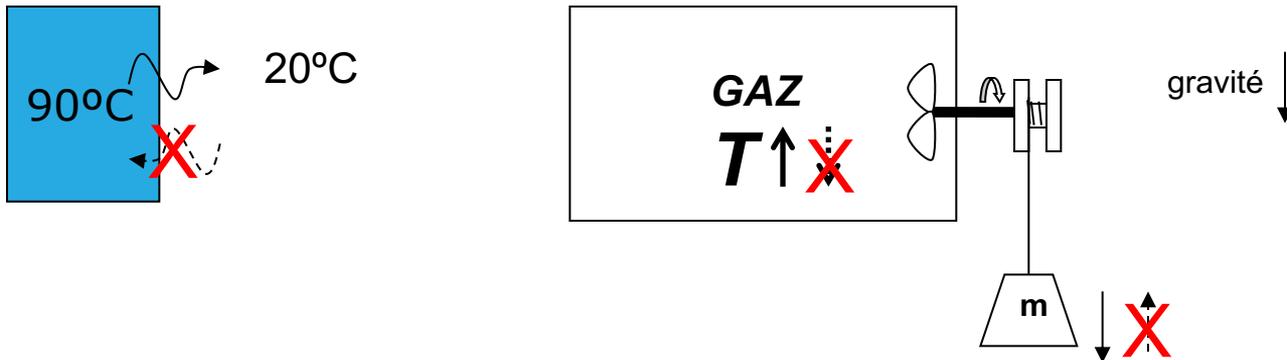


VI) SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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



SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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 considérés comme réservoirs thermiques:

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

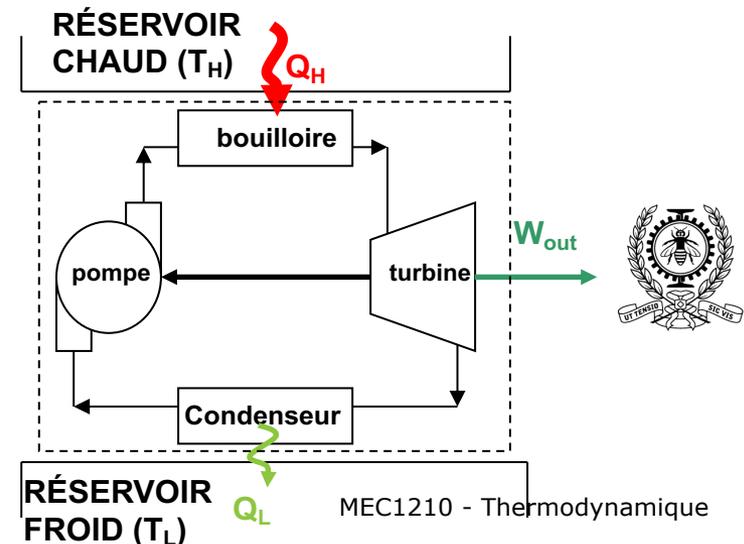
ii) Moteur thermique

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

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.
- Rendement thermique (η_{th}) =

$$\eta_{th} = \frac{\text{Output désiré}}{\text{Input}} = \frac{W_{out}}{Q_{in}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$



SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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 T_L constant
- pompe thermique: garde T_H constant

Coefficient de performance:

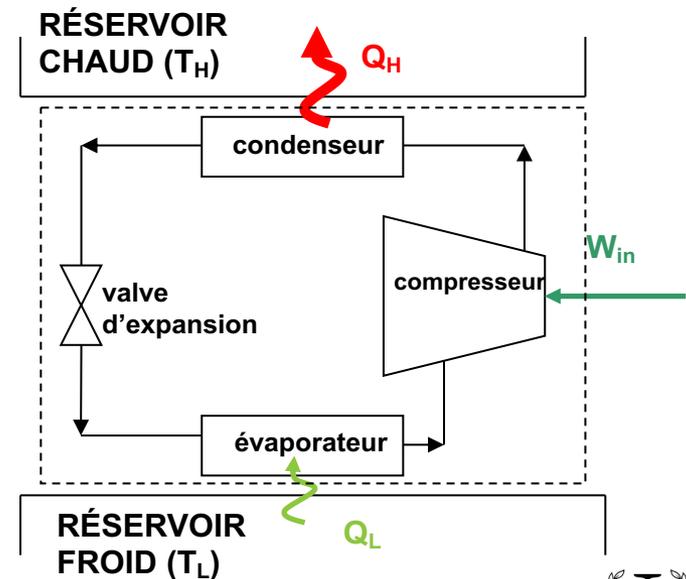
- Réfrigérateur : COP_R

$$COP_R = \frac{\text{Output désiré}}{\text{Input}} = \frac{Q_L}{W_{in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\frac{Q_H}{Q_L} - 1}$$

- Pompe thermique: COP_{PT}

$$COP_{PT} = \frac{\text{Output désiré}}{\text{Input}} = \frac{Q_H}{W_{in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - \frac{Q_L}{Q_H}}$$

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

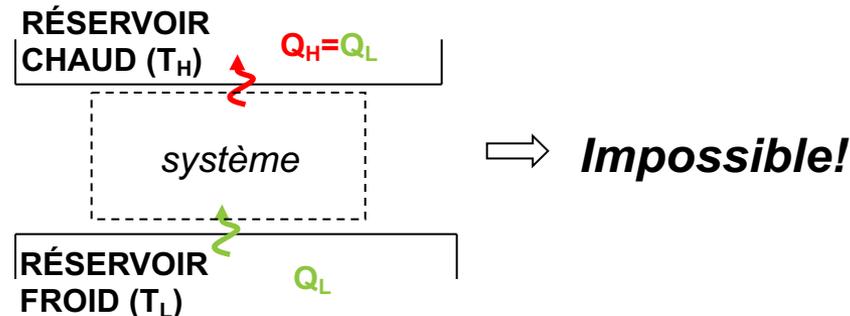


ÉNONCÉS DU SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

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

a) Énoncé de Clausius

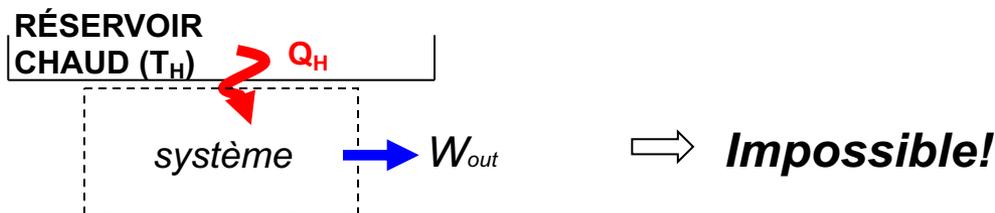
« *Aucun système ne peut uniquement (c'est-à-dire sans apport de l'environnement) transmettre de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud* »



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

b) Énoncé de Kelvin-Plank

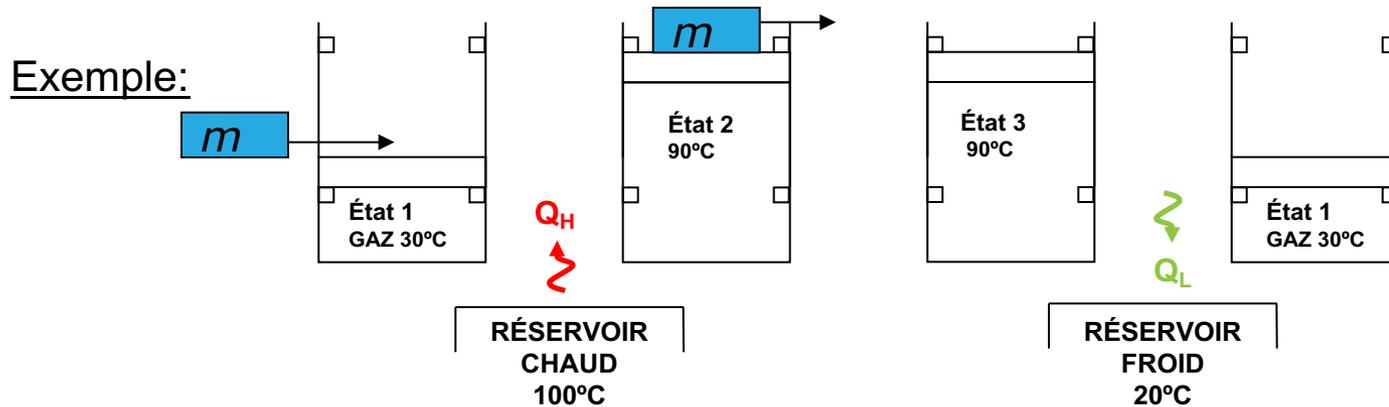
« *Aucun système ne peut accomplir un cycle et effectuer un travail net sur l'environnement en recevant de la chaleur d'un seul réservoir* »



ÉNONCÉS DU SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

b) Énoncé de Kelvin-Planck (cont.)

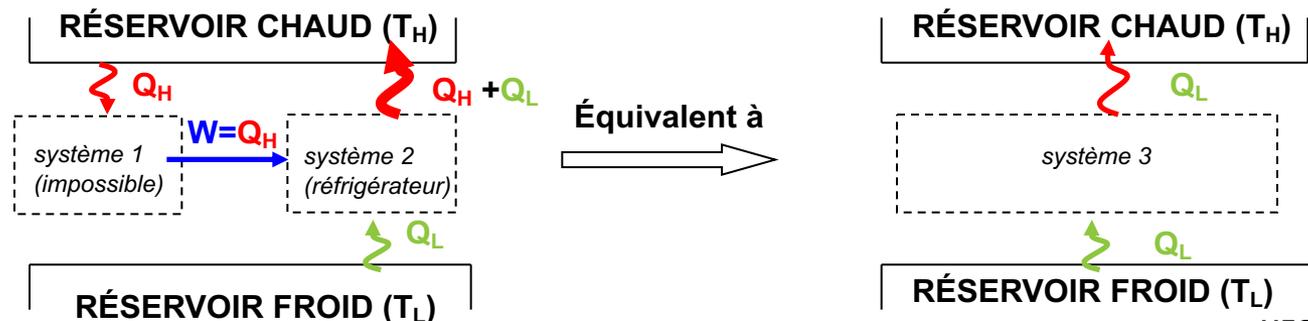
« Physiquement: on ne peut convertir 100% de la chaleur en travail ($\eta_{th} < 1.0$) »



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



Énoncé de Kelvin-Planck violé par système 1

Énoncé de Clausius violé



3) ÉVOLUTIONS RÉVERSIBLES ET IRRÉVERSIBLES

a) Évolution réversible

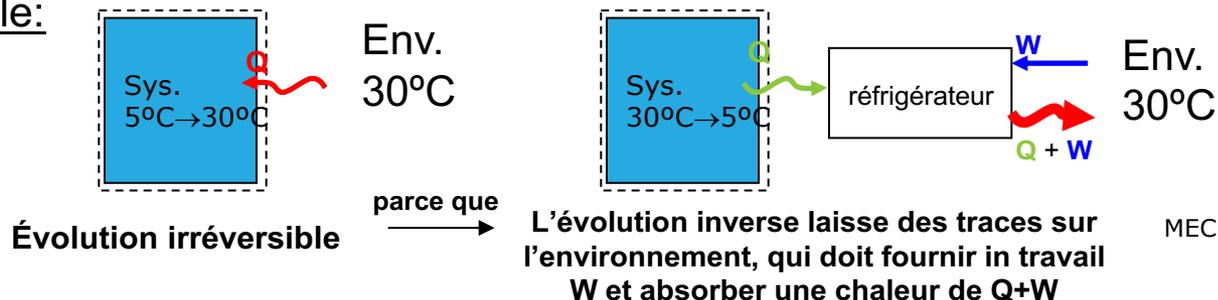
« Une évolution qui peut être inversée sans laisser de trace sur l'environnement (c'est-à-dire que le système ET l'environnement retournent tous deux exactement à leurs états initiaux) »

- 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

Exemple:

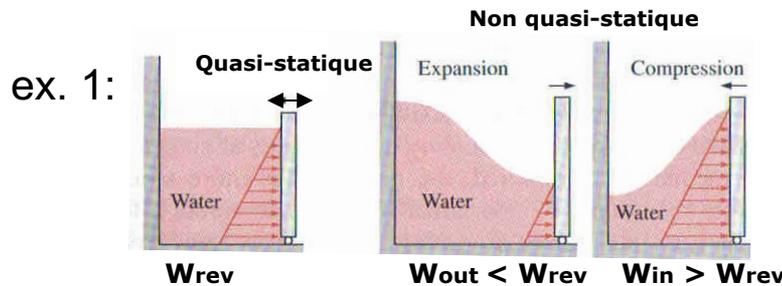


3) ÉVOLUTIONS RÉVERSIBLES ET IRRÉVERSIBLES

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



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.

Traces laissées sur l'environnement

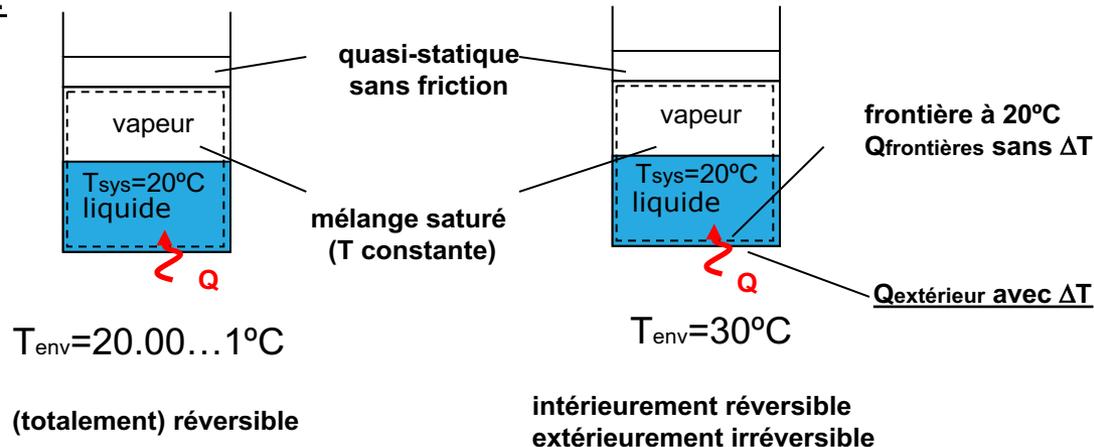


3) ÉVOLUTIONS RÉVERSIBLES ET IRRÉVERSIBLES

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

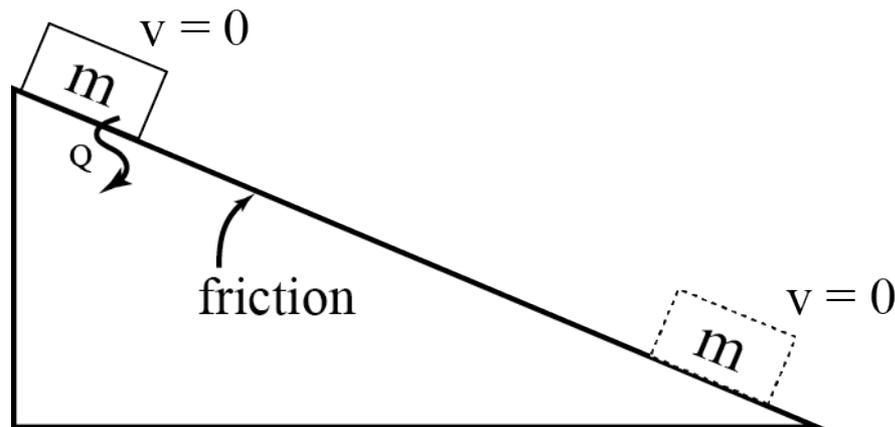
Exemple:



EXEMPLE #14: MASSE GLISSANT SUR UNE PENTE

Une masse glisse avec friction sur un bloc

- Toute la chaleur générée par la friction va a chauffer le bloc
- La masse est immobile au départ et à l'arrivée



Montrez en utilisant l'énoncé de Kelvin-Planck que cette évolution est irréversible



OÙ ON EN EST

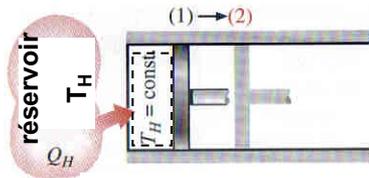
- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)
- VI) 2^{ème} principe 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



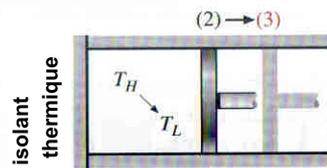
4) CYCLE DE CARNOT

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



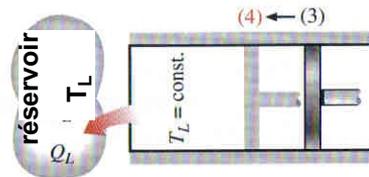
évolution 1→2

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



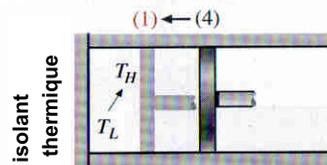
évolution 2→3

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



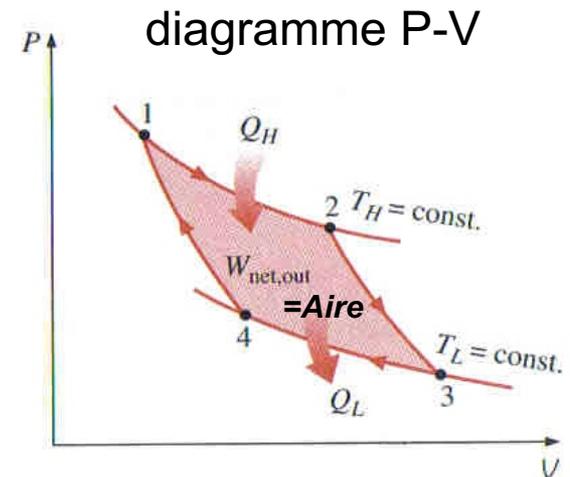
évolution 3→4

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



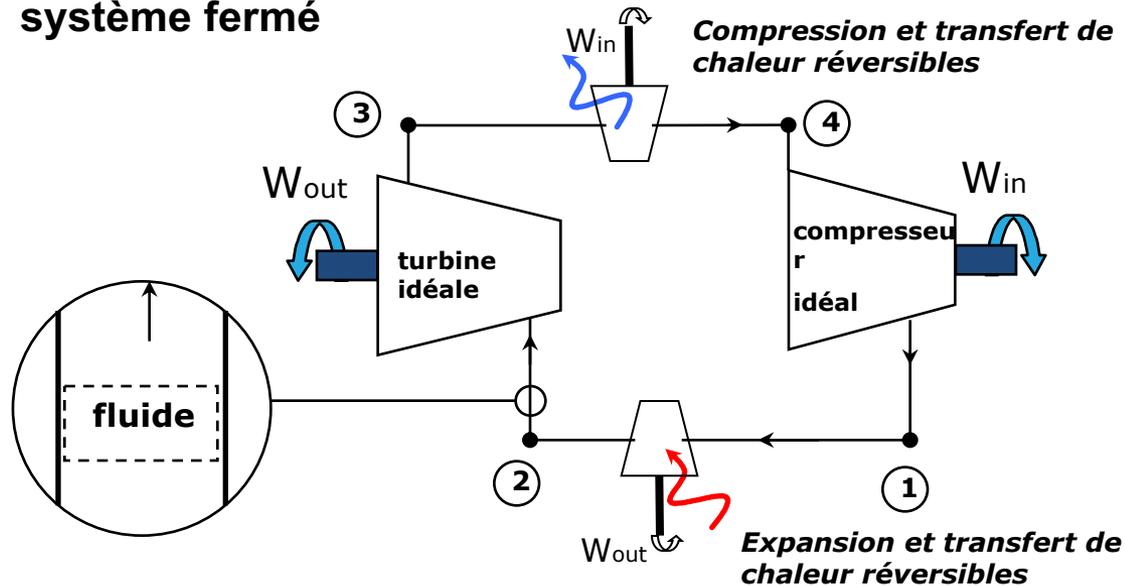
évolution 4→1

Compression adiabatique quasi-statique.
 Travail fait sur système.

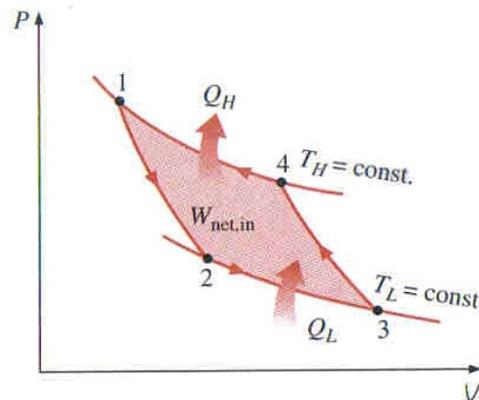


4) CYCLE DE CARNOT

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

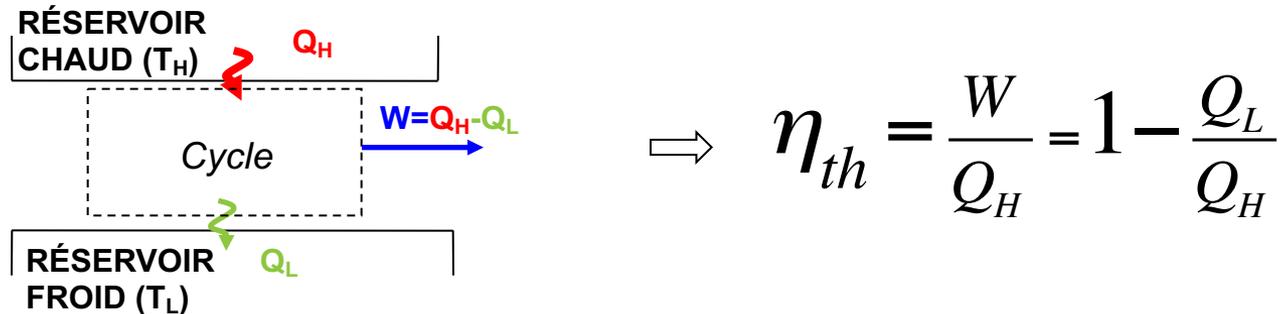


- Le cycle Carnot inversé = cycle de réfrigération optimal



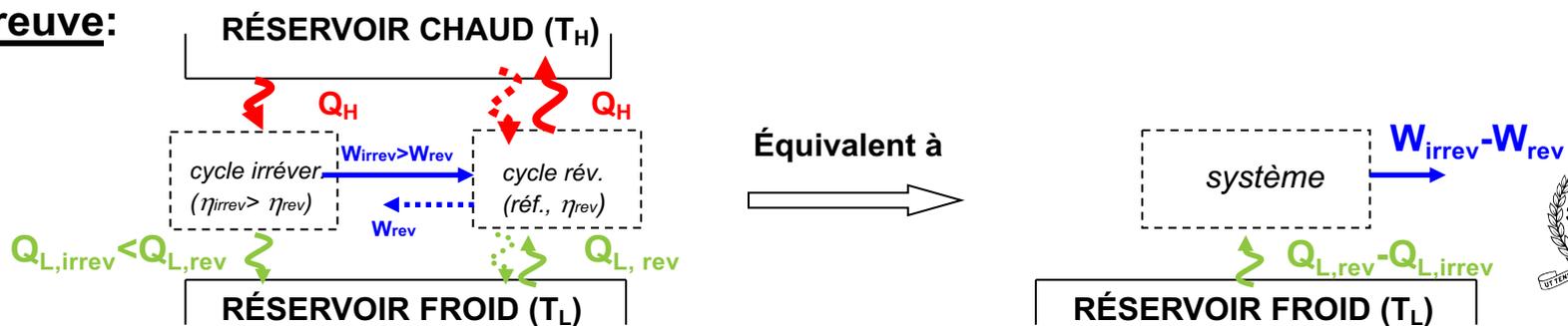
5) COROLLAIRES DU SECOND PRINCIPE

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:



Si cycle irréversible viole corollaire 1

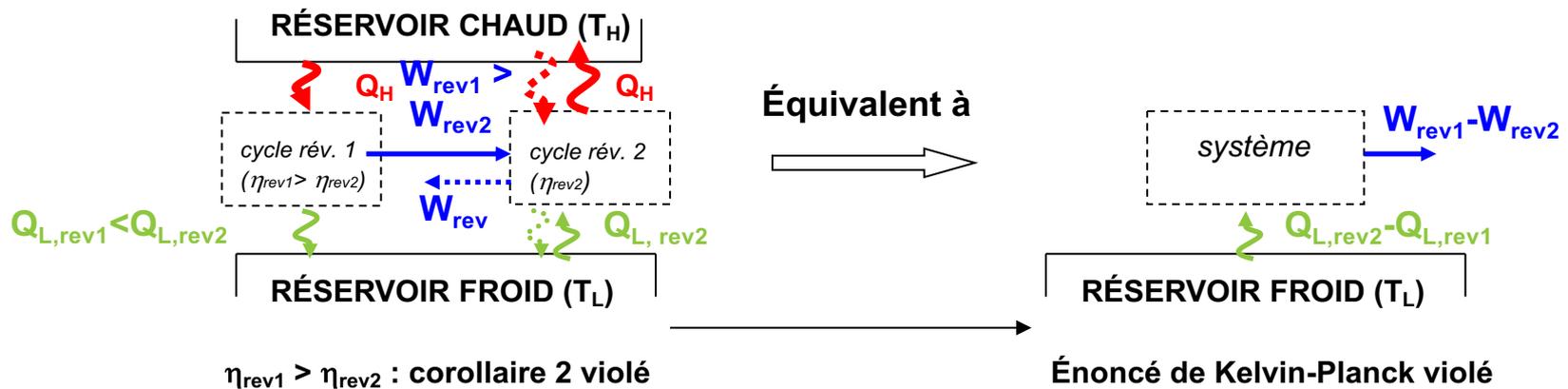
Énoncé de Kelvin-Planck violé



5) COROLLAIRES DU SECOND PRINCIPE

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

preuve:



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. »

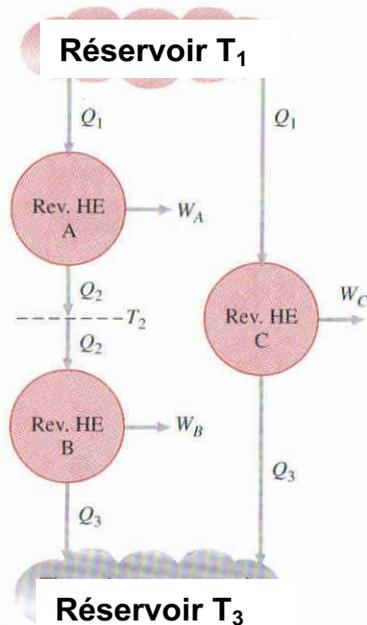
Corollaires 1 & 2:

Le rendement maximum ne dépend que des réservoirs T_H et T_L



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

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



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

$$f(T_3, T_1) = f(T_3, T_2) \cdot f(T_2, T_1) \rightarrow \text{Seulement possible si:}$$

$$f(T_3, T_1) = \frac{\phi(T_3)}{\phi(T_2)} \cdot \frac{\phi(T_2)}{\phi(T_1)}$$

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

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

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

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:

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



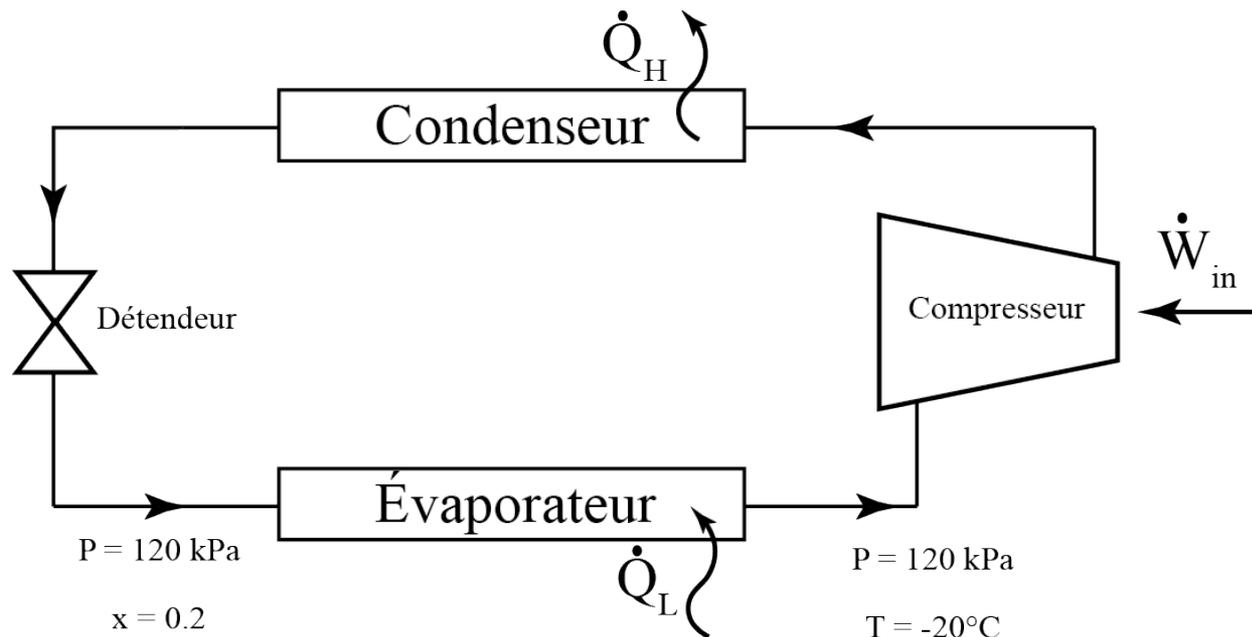
EXEMPLE #15

Congélateur domestique

- Puissance du compresseur $\dot{W} = 450\text{W}$
- $\text{COP}_R = 1.2$

On cherche:

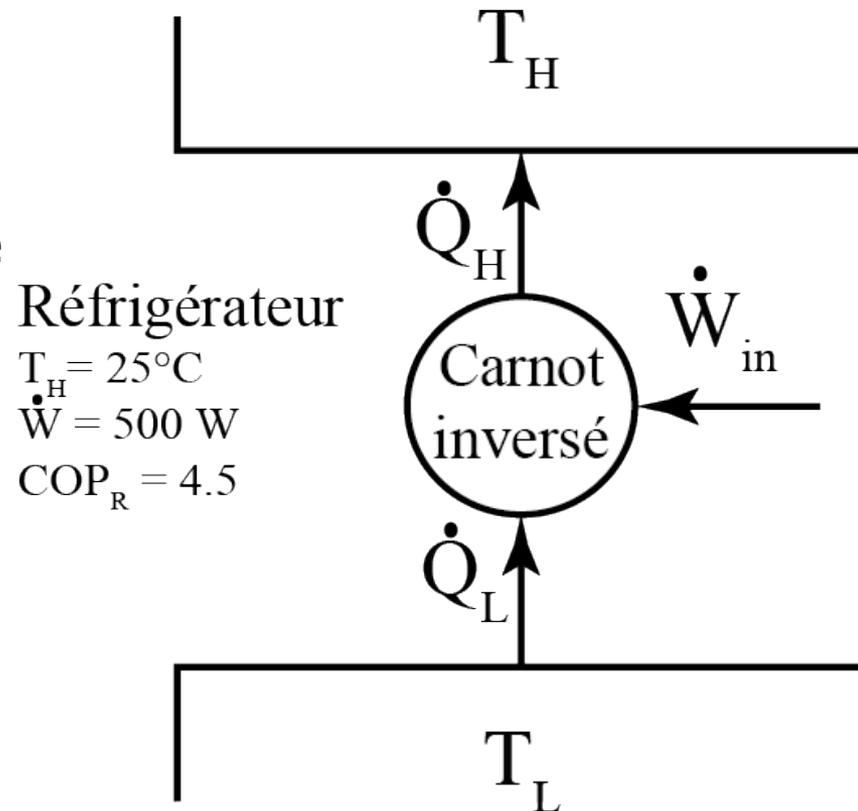
- Débit massique du réfrigérant
- Taux du rejet de chaleur dans la pièce \dot{Q}_H



EXEMPLE #16

Réfrigérateur, cycle de Carnot inversé.

- T_H est la température de l'environnement
- On cherche:
 - a) Taux de transfert de chaleur extraite du réfrigérateur \dot{Q}_L
 - b) Température du réservoir froid T_L , dans le réfrigérateur



QUESTION CONCEPTUELLE

THERMOPOMPE

Soit une thermopompe dont le COP est 3.8 et dont la puissance nominale du compresseur est de 1 hp (746 W). On l'utilise pour chauffer de l'air initialement à 7°C jusqu'à 22°C. Quel est le débit massique d'air qui peut ainsi être chauffé par la thermopompe?

- A. 49.60 kg/s
- B. 1.263 kg/s
- C. 0.448 kg/s
- D. 0.188 kg/s

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865



QUESTION CONCEPTUELLE

THERMOPOMPE

Soit une thermopompe dont le COP est 3.8. Celle-ci absorbe 5 kW du réservoir froid et l'utilise pour chauffer de l'air initialement à 7°C jusqu'à 22°C. Quel est le débit massique d'air qui peut ainsi être chauffé par la thermopompe?

- A. 2.025 kg/s
- B. 1.263 kg/s
- C. 0.451 kg/s
- D. 0.332 kg/s

TABLE A-17

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865

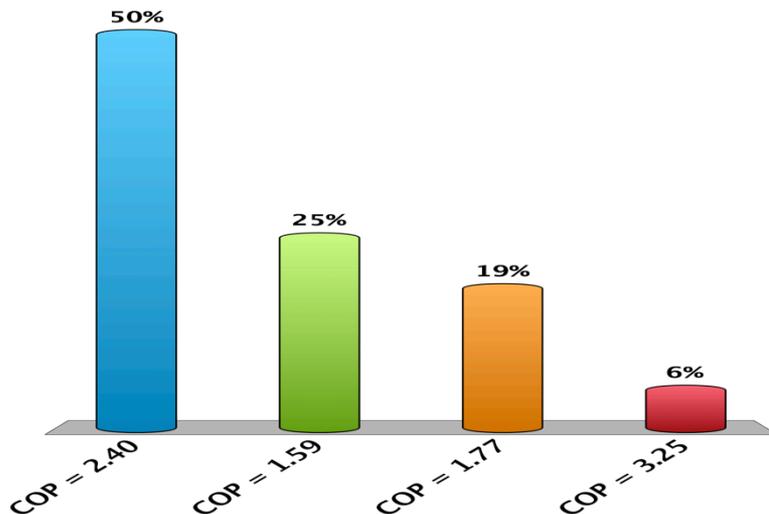


QUESTION CONCEPTUELLE

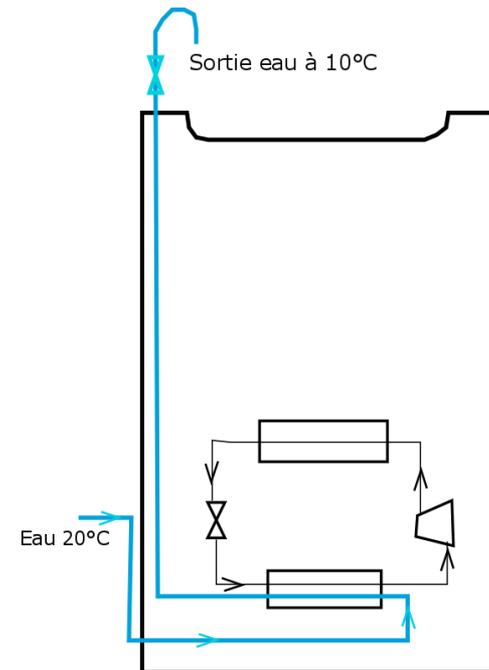
RÉFRIGÉRATEUR

L'eau entre dans une fontaine réfrigérante à 20°C et en ressort à 10°C avec un débit de 10,8 L/h. On estime que l'eau rafraîchie est réchauffée par son environnement avec une puissance de 45 W. Calculer le COP du système de réfrigération si le compresseur absorbe une puissance de 71,5W.

- A. COP = 2.40
- B. COP = 1.59
- C. COP = 1.77
- D. COP = 3.25



$C_{p,\text{eau}}$	4.22 kJ/kgK
ρ_{eau}	1000 kg/m ³



QUESTION CONCEPTUELLE

CYCLES DE CARNOT

Une machine de Carnot rejette 200 kJ de chaleur dans une source froide à 27°C pendant qu'elle produit un travail de 1000 kJ.

Calculer la température de la source chaude de cette machine.

- A. $T_H = 1527^\circ\text{C}$
- B. $T_H = 1800^\circ\text{C}$
- C. $T_H = 1200^\circ\text{C}$
- D. $T_H = 1473^\circ\text{C}$

